

Treball de Fi de Grau

## **Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

# **Simulació del trànsit a les Rondes de Barcelona: modelització, obtenció de dades, implementació i validació.**

### **MEMÒRIA**

**Autor:** Marc Vila Fàbrega  
**Director:** Ernest Benedito  
**Convocatòria:** 09/2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

Aquest treball té com a objectiu representar la xarxa de les Rondes de Barcelona amb el major realisme possible i verificar aquest model.

El primer pas per assolir aquest objectiu ha estat el de realitzar un estudi de l'estructura de la xarxa urbana de Barcelona, prestant especial interès en la Ronda de Dalt i en la Ronda Litoral. Seguidament, s'ha procedit a elaborar un model de les Rondes utilitzant el programa SUMO [1]. Aquest programa és un simulador de trànsit lliure que permet la modelització de sistemes de trànsit intermodal.

Un cop construït el model, s'ha realitzat una simulació del trànsit real de les Rondes amb el model per tal de verificar la funcionalitat d'aquest. Per dur a terme aquesta simulació, ha calgut recopilar informació sobre el trànsit de les Rondes.

Al llarg del treball, s'ha documentat la utilització del SUMO per tal de confeccionar una guia per a la modelització i verificació d'altres xarxes.

El treball finalitza comparant els resultats obtinguts en la simulació amb les dades reals del trànsit de les Rondes.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>3</b>
<b>SUMARI</b>	<b>5</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>7</b>
1.1. Origen del projecte	7
1.2. Motivació	8
1.3. Requeriments previs	8
1.4. Informe de la memòria	8
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>10</b>
2.1. Objectius del projecte	10
2.2. Abast del projecte	11
<b>3. LES RONDES</b>	<b>12</b>
3.1. La Xarxa Urbana de Barcelona	12
3.1.1. Les Rondes en detall	12
3.2. Xarxes al SUMO	14
3.2.1. Característiques de les xarxes	14
3.2.2. Formats compatibles	17
3.2.2.1. XML	17
3.2.2.2. OpenStreetMap	18
3.3. Les Rondes al SUMO	20
3.3.1. Obtenció de les dades	20
3.3.2. Filtratge de les dades	20
3.3.3. Resolució de conflictes	22
3.3.4. Compatibilitat del format	26
3.3.5. Revisió final	26
3.3.6. Documentació del resultat	33
<b>4. EL TRÀNSIT A LES RONDES</b>	<b>37</b>
4.1. Dades generals públiques	38
4.2. Sol·licitud d'informació	39
4.3. Anàlisi de les dades	41
<b>5. SIMULACIÓ</b>	<b>45</b>
5.1. Vehicles al SUMO	45
5.1.1. Vehicles i rutes	45

5.1.2. Fluxos de vehicles .....	49
5.1.3. Punts d'observació.....	51
5.2. Trànsit de les Rondes al SUMO .....	52
5.3. Aparells de mesura .....	58
5.4. Resultats de la simulació .....	61
<b>6. IMPACTE MEDIAMBIENTAL .....</b>	<b>64</b>
<b>7. PRESSUPOST .....</b>	<b>65</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>67</b>
Referències bibliogràfiques .....	67
Bibliografia complementària .....	67

# 1. Prefaci

Actualment, Barcelona és reconeguda com una ciutat global. No només per la seva importància cultural, comercial, financera i turística, sinó també per la seva posició geogràfica a Europa tocant el Mediterrani. Són milions de persones les que a diari transiten per la ciutat, i gestionar tots aquests moviments no és una feina simple. La infraestructura de la ciutat és complexa i limitada, i davant l'actual creixement demogràfic de la zona és important mantenir la funcionalitat de la xarxa urbana de la ciutat.

Tant habitants de la pròpia ciutat, com població de l'àrea metropolitana o de ciutats properes utilitzen algun medi de transport per moure's dins de la ciutat o per entrar, sortir o travessar-la. El fet de disposar d'aeroport i de port fa augmentar més encara el nombre de persones que és mou a diari per la ciutat.

És també sabut que el nombre de desplaçaments diaris augmenta any rere any i la xarxa urbana de Barcelona s'ha d'adaptar amb aquest canvi.

És necessari estudiar aquests aspectes per tal de mantenir o millorar el funcionament de la ciutat. L'única opció de realitzar aquest estudi és mitjançant simulacions. La infraestructura viària de Barcelona és massa gran i fràgil com per experimentar en el món real, i existeixen situacions que només poden ser simulades per ordinador.

Dins d'aquesta infraestructura viària, es troben les Rondes de Barcelona, les vies més transitades de la ciutat. Aquestes vies formen una xarxa que circumval·la la ciutat, permetent d'aquesta manera desviar el trànsit del centre de Barcelona. Donat la importància de les Rondes dins la xarxa urbana bàsica de la ciutat, s'ha realitzat concretament el projecte envers aquestes vies.

## 1.1. Origen del projecte

Aquest treball ha nascut amb la intenció de poder estudiar en detall el trànsit i la seva evolució a la ciutat de Barcelona. Els vehicles motoritzats (tant transport públic com transport privat) són el principal mètode de transport a la ciutat i requereixen d'una infraestructura adequada per poder garantir un creixement sostenible.

Donat l'interès personal en el funcionament dels vehicles autònoms i en els algorismes que aquests utilitzen en els seus sistemes intel·ligents, crear un escenari realista on testear aquests vehicles pot representar l'inici d'un llarg projecte.

Existeixen diversos treballs a l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona

que han tractat temes semblants, i han servit de base durant el desenvolupament d'aquest treball.

## 1.2. Motivació

En l'àmbit educatiu actual, no existeix un model de la xarxa urbana de Barcelona on poder realitzar simulacions de trànsit, o almenys no és de lliure accés. Donat el creixent mercat dels vehicles elèctrics i autònoms, moltes simulacions es duen a terme abans de llençar un producte al mercat. És per això que escenaris com aquest són necessaris. En el marc universitari existeix una diversitat de projectes important a la que disposar d'un escenari on testear diversos algoritmes o funcionalitats pot ser de gran ajuda.

## 1.3. Requeriments previs

Aquest treball ha representat una corba d'aprenentatge constant des del seu començament. Principalment, envers el programa SUMO, ja que el coneixement d'aquest software era nul en un inici. Tot i això, altres requeriments previs han sigut necessaris abans de començar el projecte.

Han calgut nocions bàsiques de programació. La majoria de fitxers que utilitza el sumo estan en format “.xml”. Haver realitzat cursos de programació en diversos llenguatges ha ajudat clarament a entendre millor l'estructura d'aquests fitxers.

També ha sigut necessari conèixer d'eines per al tractament massiu de dades. Principalment la importació de fitxers “.csv” amb l'Excel i l'ús de filtres i taules pivotals per a tractar les dades i representar gràfics, entre d'altres.

Finalment, ha sigut imprescindible tenir un coneixement general sobre la xarxa urbana de Barcelona (i en concret les Rondes de Barcelona) i conèixer les diferents entitats relacionades amb aquesta infraestructura. Generalment, un ciutadà de Barcelona porta implícits aquests coneixements.

## 1.4. Informe de la memòria

La memòria d'aquest treball segueix les pautes estàndards proporcionades per l'escola. El contingut de cada secció de la memòria serà breument descrit a continuació.



BLOC I (presentació)

1. Prefaci - Nota de presentació per definir l'estudi del projecte.

BLOC II (cos del projecte)

2. Introducció - Objectius i abast del projecte
3. Les Rondes - Estudi i creació d'un model del mapa de les Rondes de Barcelona
4. El trànsit a les Rondes - Anàlisi del trànsit de les Rondes
5. Simulació - Simulació del trànsit de les Rondes al model creat

BLOC III (conclusions)

6. Impacte mediambiental - Estudi de l'impacte mediambiental que suposa aquest projecte
7. Pressupost - Càlcul del pressupost necessari per al desenvolupament del projecte

Conclusions - Conclusions finals

## 2. Introducció

Aquest projecte ha començat tenint uns objectius clarament definits i pautats. D'aquesta manera s'ha pogut organitzar el desenvolupament del mateix i els passos a seguir en cada etapa del projecte.

Així mateix, s'han definit uns límits per no desviar-se del tòpic del treball i centrar la informació en un únic objectiu principal.

### 2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és crear un model de les Rondes de Barcelona i verificar-lo per a poder realitzar simulacions amb ell.

Per dur a terme aquest objectiu, altres objectius secundaris s'han establert i s'han anat assolint. D'altra banda, nous reptes han aparegut durant el desenvolupament del projecte i han causat la definició de nous objectius. Tot i això, l'objectiu principal ha romàs sempre el mateix.

A continuació apareixen llistats un seguit d'objectius, d'acord a l'objectiu principal, ordenats segons el desenvolupament del projecte:

- Estudiar l'estructura de les Rondes de Barcelona
- Crear un model de les Rondes de Barcelona
- Documentar com realitzar correctament un model d'una xarxa urbana real
- Obtenir dades del trànsit de les Rondes
- Documentar quines entitats s'encarreguen de la gestió d'aquestes dades a Barcelona
- Verificar el model utilitzant dades reals de trànsit
- Compartir el projecte perquè tercers puguin realitzar estudis utilitzant aquest model

## 2.2. Abast del projecte

Aquest projecte té un objectiu molt ben definit i unes pautes a seguir clares. És per això que l'abast del projecte queda limitat en aquests aspectes.

En aquest projecte es simularà el trànsit en un model de les Rondes de Barcelona. Es pretén obtenir el màxim detall en aquest model considerant tots els elements necessaris que afectin al comportament del trànsit. Això comporta estudiar la ubicació de tots els accessos de les Rondes, el nombre de carrils al llarg de la via principal, el límit de velocitat variable al llarg del recorregut i les prioritats en les incorporacions o canvis de carril entre d'altres.

En aquest projecte també es procurarà documentar el procediment a seguir per a dur a terme simulacions semblants de trànsit real a altres ubicacions.

## 3. Les Rondes

### 3.1. La Xarxa Urbana de Barcelona

Barcelona consta avui en dia d'una xarxa urbana molt ben definida i estructurada. Les vies principals es coneixen com "xarxa bàsica" i estan formades per les rondes, les vies d'accés a la ciutat i les connexions internes.



Il·lustració 1. Xarxa Urbana de Barcelona (Font: Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona 2013-2018)

Aquesta estructura reticular té la funció de distribuir els centenars de milers de vehicles que diàriament hi transiten i han d'estar preparades per poder manejar la intensitat de trànsit donada.

Des de l'Ajuntament de Barcelona, cada any es redacta i es publica un informe [2] [3] sobre les dades bàsiques de mobilitat de la ciutat. En aquest informe es pot trobar informació rellevant sobre el trànsit i la xarxa urbana de la ciutat.

#### 3.1.1. Les Rondes en detall

Les Rondes de Barcelona formen part de la Xarxa Urbana de Barcelona i són dues de les vies més importants que la componen: la Ronda de Dalt i la Ronda Litoral. (La Ronda del Mig no

ha sigut considerada en aquest estudi).

La Ronda de Dalt, o B-20, recorre la part alta de la ciutat i comunica el Nus de la Trinitat amb el Nus del Llobregat en ambdós sentits per la part de la muntanya. Existeixen, a part, dues branques conegudes com “Pota Nord” i “Pota Sud” que amplien l’extensió de la ronda de 16km a 26km.

La Ronda Litoral, o B-10, recorre la part costera de Barcelona i comunica el Nus de la Trinitat amb el Nus del Llobregat en ambdós sentits. Té una extensió de 20km.

Les Rondes van ser ideades amb l’objectiu de circumval·lar la ciutat i d’aquesta manera reduir la pressió del trànsit al centre. Actualment formen un cinturó de 36km amb entrades i sortides per tota la ciutat. Són considerades vies ràpides amb un límit màxim de velocitat de 80km/h (reduït en alguns trams) i sense cap intersecció o semàfor que provoqui l’aturada del trànsit. En la major part del recorregut hi ha tres carrils en cada sentit, però en alguns trams aquest número es veu reduït a dos.

És important destacar que al circuit de les Rondes és on més retencions es produeixen dins de la xarxa urbana de Barcelona. A la següent imatge es representa la intensitat del trànsit utilitzant un codi de colors a la xarxa urbana de Barcelona. Es pot apreciar com a les Rondes és on es concentren els trams amb més intensitat.



Il·lustració 2. Intensitat del trànsit a Barcelona (Font: Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona 2013-2018)

Aquest circuit serà l'estudiat en aquest treball, tot considerant els màxims detalls possibles requerits per a una simulació del trànsit.

## **3.2. Xarxes al SUMO**

Les Xarxes vehiculars a SUMO tenen una estructura determinada. És important conèixer el funcionament del programa abans de començar a introduir informació per garantir que la posterior simulació funcionarà correctament.

Existeix una documentació oficial detallada [4] de totes les funcionalitats del programa així com exemples i descàrregues i preguntes freqüents respostes.

### **3.2.1. Característiques de les xarxes**

Les vies a SUMO estan formades bàsicament per nodes i arestes que els uneixen. Cada node i cada aresta té uns atributs que el defineix, alguns són obligatòriament requerits pel programa i altres són opcionals. Alguns d'aquests atributs opcionals seran utilitzats sempre que aportin informació rellevant a la simulació i permetin obtenir una simulació més realista.

Els atributs disponibles per a un node es troben llistats a continuació. Juntament, es pot trobar el valor que pot prendre cada atribut i una breu descripció. Apareixen en negreta els atributs obligatoris.



Attribute Name	Value Type	Description
id	id (string)	The name of the node
x	float	The x-position of the node on the plane in meters
y	float	The y-position of the node on the plane in meters
z	float	The z-position of the node on the plane in meters
type	enum ( "priority", "traffic_light", "right_before_left", "unregulated", "priority_stop", "traffic_light_unregulated", "allway_stop", "rail_signal", "zipper", "traffic_light_right_on_red", "rail_crossing")	An optional type for the node
tlType	enum ( "static", "actuated")	An optional type for the traffic light algorithm
tl	id (string)	An optional id for the traffic light program. Nodes with the same tl-value will be joined into a single program
radius	positive float;	optional turning radius (for all corners) for that node in meters (default 1.5)
shape	List of positions; each position is encoded in x,y or x,y,z in meters (do not separate the numbers with a space!).	A custom shape for that node. If less than two positions are given, netconvert will reset that node to use a computed shape.
keepClear	bool	Whether the <i>junction-blocking-heuristic</i> should be activated at this node (default true)
controlledInner	list of edge ids	Edges which shall be controlled by a joined TLS despite being incoming as well as outgoing to the jointly controlled nodes

Taula 1. Atributs d'un node (Font: SUMO User Documentation)

L' "id" del node serà utilitzat per localitzar-lo en la simulació i referir-nos a ell en cas que sigui necessari. Les coordenades "x" i "y" són de vital importància per aconseguir que l'escenari de la simulació tingui exactament la mateixa forma que les Rondes. L'atribut "type" tindrà sempre el valor de "priority", ja que no existeix cap semàfor a les Rondes i la prioritat en cada enllaç podrà ser editada posteriorment i específicament per a cada node. Els atributs "radius" i "shape" també són importants per obtenir el màxim detall de la forma de les vies. Els demés atributs no seran utilitzats.

Els atributs disponibles per a una aresta es troben llistats a continuació. Juntament, es pot trobar el valor que pot prendre cada atribut i una breu descripció. Apareixen en negreta els atributs obligatoris.

Attribute Name	Value Type	Description
id	id (string)	The id of the edge (must be unique)
from	referenced node id	The name of a node within the nodes-file the edge shall start at
to	referenced node id	The name of a node within the nodes-file the edge shall end at
type	referenced type id	The name of a type within the SUMO edge type file
numLanes	int	The number of lanes of the edge; must be an integer value
speed	float	The maximum speed allowed on the edge in m/s; must be a floating point number (see also "Using Edges' maximum Speed Definitions in km/h")
priority	int	The priority of the edge
length	float	The length of the edge in meter
shape	List of positions; each position is encoded in x,y or x,y,z in meters (do not separate the numbers with a space!).	If the shape is given it should start and end with the positions of the from-node and to-node. Alternatively it can also start and end with the position where the edge leaves or enters the junction shape. This gives some control over the final junction shape. When using the option <b>--plain.extend-edge-shape</b> it is sufficient to supply inner geometry points and extend the shape with the starting and ending node positions automatically
spreadType	enum ( "right", "center" )	The description of how to spread the lanes; "center" spreads lanes to both directions of the shape, any other value will be interpreted as "right"
allow	list of vehicle classes	List of permitted vehicle classes (see <a href="#">access permissions</a> )
disallow	list of vehicle classes	List of forbidden vehicle classes (see <a href="#">access permissions</a> )
width	float	lane width for all lanes of this edge in meters (used for visualization)
name	string	street name (need not be unique, used for visualization)
endOffset	float >= 0	Move the stop line back from the intersection by the given amount (effectively shortening the edge and locally enlarging the intersection)
sidewalkWidth	float >= 0	Adds a sidewalk with the given width (defaults to -1 which adds nothing).

Taula 2. Atributs d'una aresta (Font: SUMO User Documentation)

L' "id" de l'aresta serà utilitzat per identificar-la i referir-nos a ella en la posterior simulació. Els atributs "from" i "to" són també indispensables per ubicar l'aresta i fan referència als identificadors dels nodes entre els que es troba l'aresta. L'atribut "type" s'utilitzarà per definir classes d'arestes generals i evitar configurar cada aresta individualment. Alguns atributs com "speed" es poden incloure dins la classe i així no és necessari afegir-los per cada aresta. L'atribut "priority" permetrà editar la prioritat de cada carril de l'aresta en els accessos a les Rondes i en casos de canvi de carril. Els atributs "length" i "shape" permeten definir la forma de cada aresta per tal de aproximar-la al màxim possible a la realitat. L'atribut "numLanes" és també indispensable per definir el número de carrils de cada aresta. Els demés atributs no seran utilitzats. Es podrien utilitzar els atributs "width" i "name" per estètica, però no aporten altre valor que aquest a la simulació. Els atributs "allow" i "disallow" haurien de ser utilitzats si a la simulació hi haguessin vies de diferents tipus i no tots els vehicles estiguessin autoritzats a circular per totes les vies, però no és el cas ja que contem únicament amb un tipus de via.

Conèixer tota aquesta informació sobre els nodes i les arestes permet entendre com s'ha d'estructurar la xarxa abans de crear-la. A continuació s'esmenten totes les situacions que es poden donar creant la xarxa de les Rondes i com prosseguir en cada cas.

- En cada final de via caldrà crear un node, ja que les arestes van des d'un node fins a un altre.
- En cada entrada i en cada sortida de les Rondes serà necessari afegir un node. Per una sortida qualsevol (és el mateix cas per una entrada) aquest node enllaçarà tres arestes: el tros de Ronda abans de la sortida, el tros de ronda després de la sortida i la pròpia sortida. Si no hi hagués cap sortida no hi hauria cap motiu per crear un node entre els trossos que hem definit com abans i després de la sortida.
- En el cas de que algun dels atributs d'una aresta hagi de ser canviat al llarg d'un tram de les rondes, caldrà afegir un node i una nova aresta a continuació, ja que els atributs d'una aresta són constants per tota l'aresta. Per exemple, si canvia el límit de velocitat en la via, caldrà definir una nova aresta a partir d'aleshores amb l'atribut "speed" actualitzat. El mateix cas seria trobar-nos amb un estretament de la via disminuint el nombre de carrils o a la inversa.

Tota aquesta informació relativa a la xarxa, SUMO la llegeix des d'un fitxer amb format ".net.xml". Existeixen diverses maneres de crear aquest fitxer i d'editar-lo. SUMO incorpora un editor gràfic anomenat NETEDIT que permet visualitzar la xarxa i editar els atributs de cada element manualment i individualment. També és possible editar el fitxer amb un editor de text,



però això pot comportar fallades en el sistema ja que l'estructura del fitxer “.net.xml” és complicada i existeixen relacions internes que cal conèixer. Per exemple si es canvia l’ “id” d’un node utilitzant NETEDIT es canviaran automàticament els atributs “from” i “to” de les arestes que continguin el node. Si es fa editant el fitxer a mà s'haurà de ser conscient de quines arestes són aquestes per canviar els atributs manualment.

### 3.2.2. Formats compatibles

SUMO permet importar xarxes vehiculars amb multitud de formats i característiques. És important comparar quines diferents possibilitats existeixen i quina és l'adient per a l'ús requerit per aquest treball.

Degut a la necessitat d'utilitzar dades amb la major precisió geogràfica possible i amb informació sobre els atributs comentats anteriorment, dues possibilitats han estat estudiades: redactar els fitxers necessaris a mà en format XML o utilitzar el software d'OpenStreetMap per obtenir les dades.

#### 3.2.2.1. XML

Primerament s'ha estudiat la possibilitat de crear una xarxa escrivint els fitxers necessaris en el llenguatge que SUMO utilitza. Això comportaria crear dos fitxers: un fitxer on es defineixen tots els nodes i un altre fitxer on es defineixen totes les arestes.

El fitxer on es defineixen els nodes té l'extensió “.nod.xml” i un exemple del contingut d'aquest fitxer és pot veure a continuació.

```
<nodes>
  <node id="0" x="0.0" y="0.0" type="traffic_light"/> <!-- def. of node "0" -->
  <node id="1" x="-500.0" y="0.0" type="priority"/> <!-- def. of node "1" -->
  <node id="2" x="+500.0" y="0.0" type="priority"/> <!-- def. of node "2" -->
  <node id="3" x="0.0" y="-500.0" type="priority"/> <!-- def. of node "3" -->
  <node id="4" x="0.0" y="+500.0" type="priority"/> <!-- def. of node "4" -->
  <node id="m1" x="-250.0" y="0.0" type="priority"/> <!-- def. of node "m1" -->
  <node id="m2" x="+250.0" y="0.0" type="priority"/> <!-- def. of node "m2" -->
  <node id="m3" x="0.0" y="-250.0" type="priority"/> <!-- def. of node "m3" -->
  <node id="m4" x="0.0" y="+250.0" type="priority"/> <!-- def. of node "m4" -->
</nodes>
```

Il·lustració 3. Exemple de fitxer amb nodes (Font: SUMO User Documentation)

El fitxer on es defineixen les arestes té l'extensió “.edg.xml” i un exemple del contingut d'aquest fitxer es pot veure a continuació.

```

<edges>

  <edge id="lfi" from="l" to="m1" priority="2" numLanes="2" speed="11.11"/>
  <edge id="lsi" from="m1" to="0" priority="3" numLanes="3" speed="13.89"/>
  <edge id="lo" from="0" to="1" priority="1" numLanes="1" speed="11.11"/>

  <edge id="2fi" from="2" to="m2" priority="2" numLanes="2" speed="11.11"/>
  <edge id="2si" from="m2" to="0" priority="3" numLanes="3" speed="13.89"/>
  <edge id="2o" from="0" to="2" priority="1" numLanes="1" speed="11.11"/>

  <edge id="3fi" from="3" to="m3" priority="2" numLanes="2" speed="11.11"/>
  <edge id="3si" from="m3" to="0" priority="3" numLanes="3" speed="13.89"/>
  <edge id="3o" from="0" to="3" priority="1" numLanes="1" speed="11.11"/>

  <edge id="4fi" from="4" to="m4" priority="2" numLanes="2" speed="11.11"/>
  <edge id="4si" from="m4" to="0" priority="3" numLanes="3" speed="13.89"/>
  <edge id="4o" from="0" to="4" priority="1" numLanes="1" speed="11.11"/>

</edges>

```

Il·lustració 4. Exemple de fitxer amb arestes (Font: SUMO User Documentation)

La nomenclatura a utilitzar és simple. Com es pot entendre als exemples, cada línia correspon a un node o a una aresta i s'hi poden afegir els atributs necessaris. Aquests atributs són els que s'han comentat a l'apartat anterior. A part dels atributs esmentats, també és possible afegir configuracions extres canviant el format d'aquests fitxers. Degut a que la informació aportada fins ara és suficient per definir perfectament les Rondes, no ha sigut necessari indagar en aquests aspectes.

Un cop aquests dos fitxers estan enllestits, s'ha d'utilitzar el software NETCONVERT per transformar aquests dos fitxers en un fitxer que incorpora tota la xarxa i té l'extensió *".net.xml"*. Aquest fitxer té una estructura diferent i conté la informació de tota la xarxa. NETCONVERT s'encarrega d'enllaçar totes les arestes amb els nodes respectant les característiques que s'han especificat als atributs. En cas que hi hagi algun error tipogràfic a qualsevol dels dos fitxers o existeixi alguna incompatibilitat NETCONVERT ho notificarà quan sigui executat.

La principal avantatge d'aquest mètode és que l'usuari s'assegura que la configuració de cada node i de cada aresta és exactament com ell desitja i així ho ha especificat.

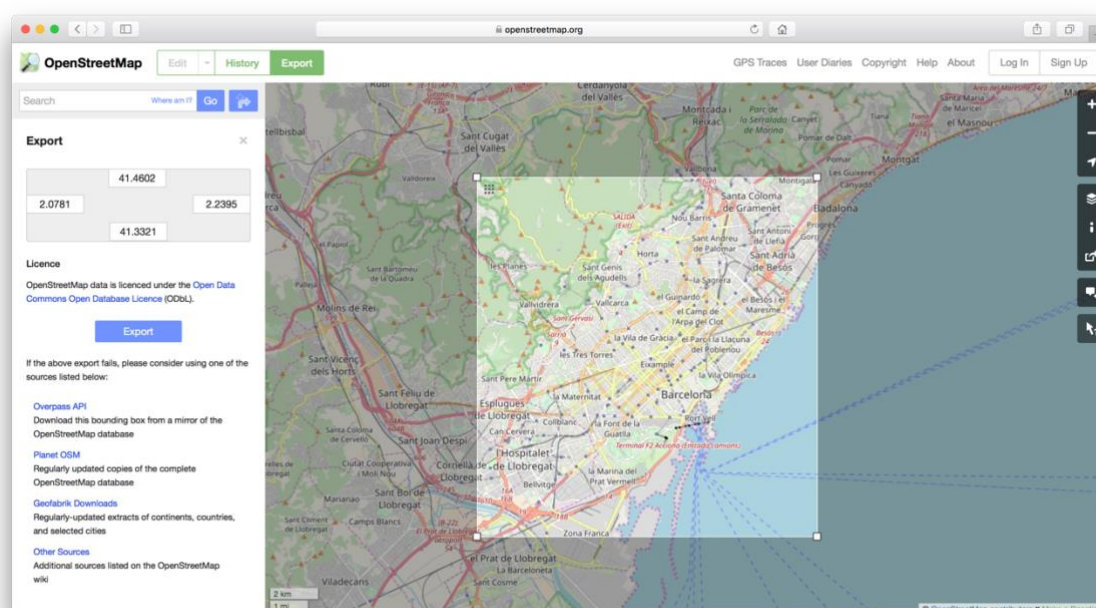
Els principal inconvenient és l'excés de treball necessari. Amb l'objectiu de realitzar una simulació realista, és important ser el més precís possible en termes de coordenades geogràfiques de cada punt de les Rondes. Es necessitarien per tant infinits punts per descriure perfectament la forma de les Rondes. A part d'obtenir les coordenades geogràfiques per cada punt, s'ha d'escriure aquesta informació manualment en un fitxer. Això comportaria molt de temps i és per això que, tot i ser l'opció més precisa, aquest mètode ha estat descartat.

### 3.2.2.2. OpenStreetMap

OpenStreetMap [5] és un projecte col·laboratiu que té com a objectiu recopilar informació geogràfica de manera lliure. D'aquest projecte és destacable que les dades geogràfiques no provenen únicament de satèl·lits com a la majoria de plataformes, sinó que els usuaris poden

editar aquesta informació mitjançant els seus propis dispositius GPS. D'aquesta manera, OpenStreetMap consta d'un mapa mundial amb complet detall i el comparteix de manera lliure amb tots els seus usuaris.

Per obtenir dades sobre una zona en concret del món, és pot seleccionar la parcel·la d'interès amb el cursor en la pàgina web de la plataforma i exportar les dades de la zona seleccionada en format “.osm”. Aquest fitxer contindrà informació sobre tots els elements que hi hagi a la parcel·la seleccionada: tant xarxes urbanes com edificis o qualsevol altre element d'una ciutat.



Il·lustració 5. Procés d'exportació a OpenStreetMap (Font pròpia)

Aquest fitxer es pot convertir al format “.net.xml” que utilitza SUMO utilitzant novament l'eina NETCONVERT.

L'avantatge principal d'aquest mètode és que la geolocalització de cada tram de les rondes ja està feta i les dades tenen alta fiabilitat, ja que la plataforma OpenStreetMap és utilitzada mundialment i considerada una font rigorosa de dades. També és menys feixuc el procés d'importar la xarxa d'aquesta manera en comptes d'escriure fitxers de text manualment.

L'inconvenient d'aquest mètode és que s'han d'identificar posteriorment tots els elements de la xarxa que siguin necessaris ja que no es coneix l'identificador de cap node ni aresta.

### 3.3. Les Rondes al SUMO

Un cop presentat el circuit de les Rondes a estudiar i el funcionament de les xarxes al SUMO, es pot procedir a crear l'escenari de les Rondes al SUMO.

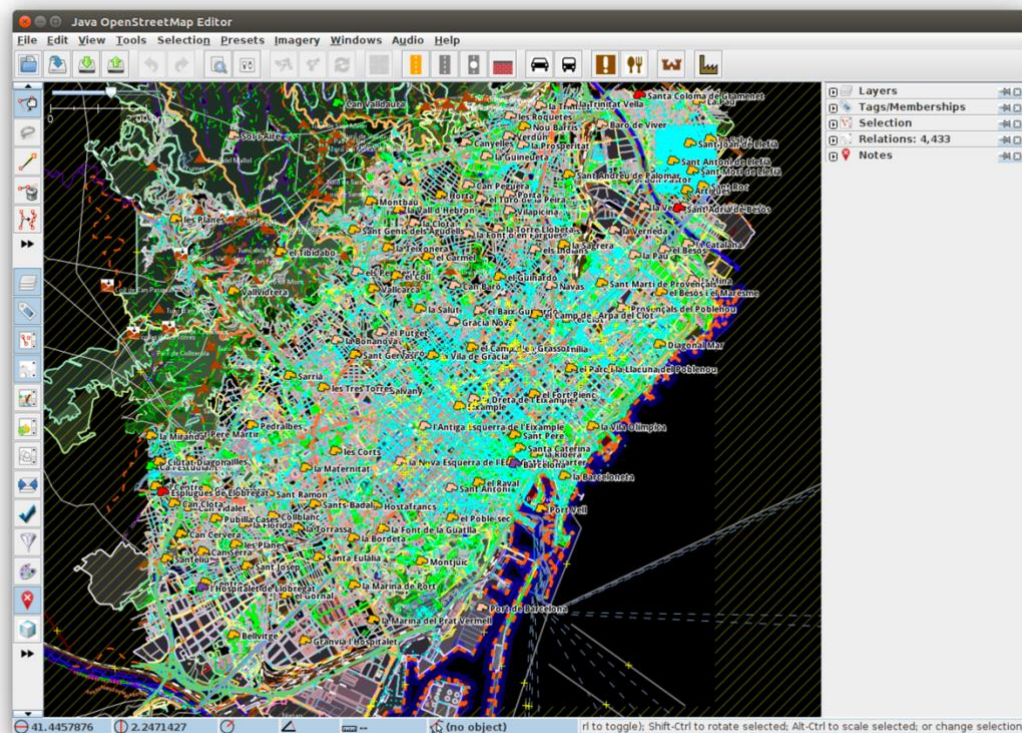
#### 3.3.1. Obtenció de les dades

L'opció triada per obtenir les dades ha estat descarregar-les d'OpenStreetMap. És clarament l'opció més adient donat el treball que s'està fent.

S'ha procedit doncs a seleccionar manualment des de la web d'OpenStreetMap la menor àrea possible que contingui les Rondes de Barcelona. D'aquesta manera es treballarà amb les menors dades possibles que contenen tota la informació de les Rondes. Donat que no és possible descarregar més de 50.000 nodes directament des de la plataforma, és necessari utilitzar l'opció "Overpass API" i descarregar les dades des d'un repositori secundari, copiat del principal. Les dades obtingudes són exactament les mateixes que de forma convencional, però OpenStreetMap restringeix la baixada d'arxius molt pesats del seu servidor principal per no saturar la xarxa. La mida del fitxer en format ".osm" descarregat és de més de 100MB.

#### 3.3.2. Filtratge de les dades

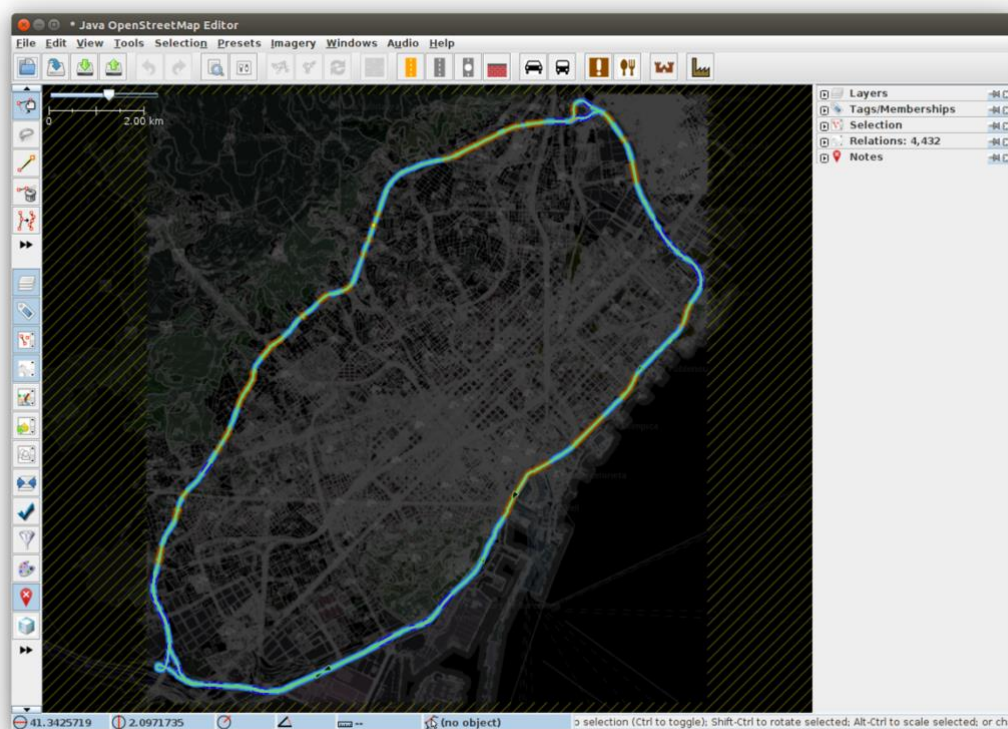
Un cop obtingut aquest fitxer, i degut al seu pes i l'excés d'informació que conté, és convenient esborrar la informació innecessària. Aquesta informació és tota la xarxa urbana de Barcelona exceptuant les Rondes. Per dur a terme aquest filtratge, existeixen diferents eines. Una possible eina presentada anteriorment és utilitzar NETCONVERT per transformar el fitxer ".osm" al format ".net.xml" que utilitza SUMO i editar la xarxa mitjançant NETEDIT. Aquesta opció queda primerament descartada ja que l'arxiu a editar és massa gran i NETEDIT no funciona correctament amb tanta informació en la versió actual (1.0.0) executat en un ordinador comú. El software triat per editar aquesta informació ha estat doncs JOSM (Java OpenStreetMap) [6]. JOSM és simplement un editor de fitxers ".osm" que funciona amb Java. Aquest software lliure és multiplataforma i ha estat descarregat en la seva versió 14178 per a Ubuntu. El seu funcionament és senzill i intuïtiu. A continuació es mostra una imatge del fitxer ".osm" visualitzat amb el programa JOSM.



Il·lustració 6. Interfície del JOSM (Font pròpia)

Es pot apreciar a ull nu l'excés d'informació que aquest fitxer conté, ja que l'única informació rellevant i que serà d'estudi és la relativa únicament a les Rondes i a les entrades i sortides d'aquestes. Aleshores és necessari esborrar tota la informació sobrant. Existeixen mètodes per esborrar grups de vies que satisfan una condició concreta, per exemple esborrar totes les vies que no tenen tipus "autopista". Aquesta funció és aparentment útil però no ha pogut ser utilitzada ja que al llarg de les Rondes es troben diferents tipus de vies i les entrades i sortides tenen un altre tipus. Conseqüentment, s'ha procedit a eliminar manualment la informació sobrant utilitzant l'eina "Lasso" que permet seleccionar tots els ítems dins de la zona especificada. Després d'esborrar totes les vies innecessàries el resultat es mostra a continuació.





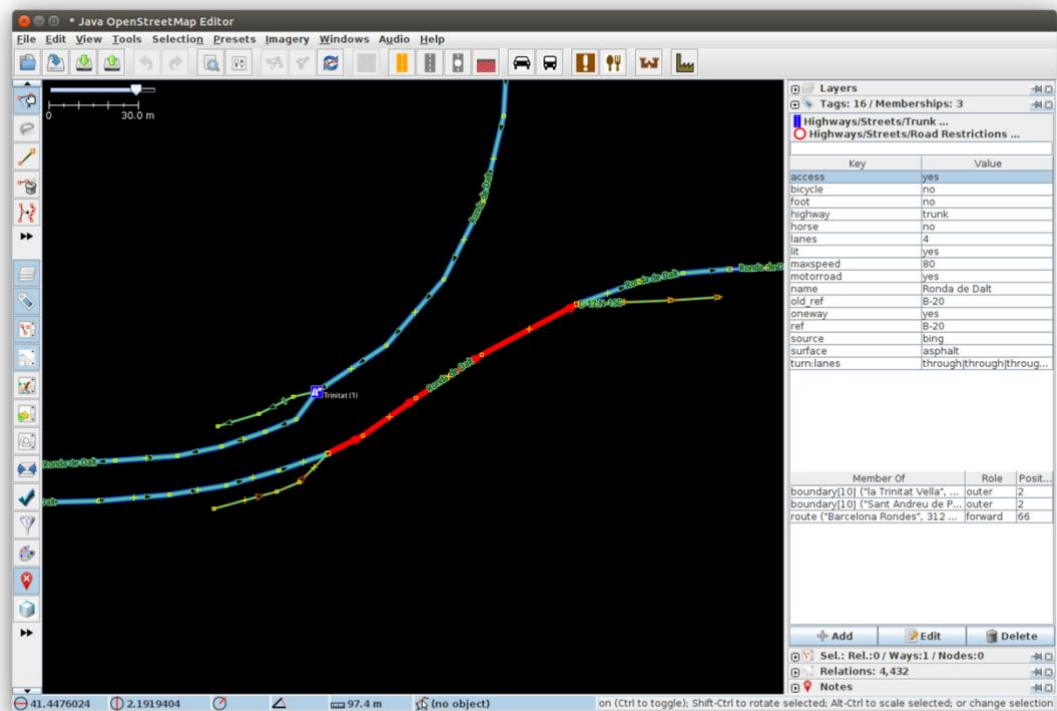
*Il·lustració 7. Rondes de Barcelona al JOSM (Font pròpia)*

En un to gris s'ha mantingut el mapa original de Barcelona, per simple estètica en la representació. En el fitxer “.osm” definitiu cap informació relativa a aquest apareix, únicament hi consta la informació relativa a les vies acolorides. Es pot apreciar també un canvi de color al llarg de les Rondes. Aquest canvi és de mínima importància ja que únicament indica que la via és un túnel o un pont entre d'altres, o altres tipus de via.

### **3.3.3. Resolució de conflictes**

A part de la xarxa formada per la via principal de les Rondes, cal detallar com s'han tractat les entrades i les sortides de les Rondes i com s'ha resolt la unió entre les dues Rondes tant al Nus del Llobregat com al Nus de la Trinitat.

A continuació es mostra una imatge ampliada i amb més detall on es pot veure com s'ha resolt l'aspecte de les entrades i les sortides de les Rondes.



Il·lustració 8. Entrades i sortides de les Rondes al JOSM (Font pròpia)

Abans d'explicar qualsevol aspecte, cal recordar que aquest fitxer segueix en format “.osm” i per tant no segueix les mateixes pautes per a la creació de nodes i arestes que els fitxers que utilitza el SUMO. Afegit aquest aspecte, a la columna de la dreta de la finestra podem veure diferent informació relativa a la via seleccionada, que apareix en color vermell. Encara és d'hora per revisar que tota aquesta informació és correcta, ja que posteriorment s'haurà de canviar el format del fitxer al compatible amb el SUMO i es podran editar aquests aspectes amb l'eina NETEDIT. Igualment, aquesta informació és útil per fer petites comprovacions i verificar que el camí seguit és el correcte.

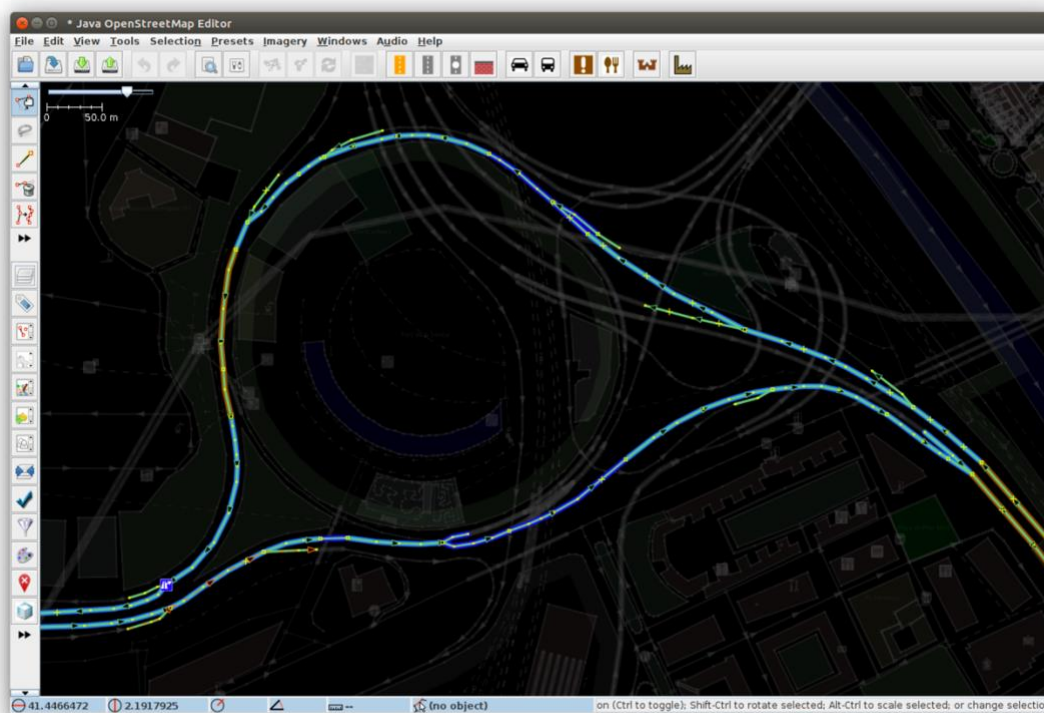
A la imatge anterior també es pot veure en color verd diverses entrades i sortides de la Ronda de Dalt. Es veu que són d'un color diferent perquè són considerades un tipus de via diferents. També es pot veure el sentit del trànsit a cada via segons les fletxes que hi apareixen a sobre.

En la posterior simulació amb trànsit, serà necessari introduir vehicles a les Rondes i també extreure'n, igual que passa en la realitat. Els accessos de les Rondes són coneguts com entrades i sortides. S'ha decidit mantenir un tros de via per cada entrada i sortida de la via d'uns 50 metres. D'aquesta manera, els vehicles que entrin i surtin de la xarxa ho faran des de l'inici d'un carril d'entrada i des de el final d'un carril de sortida respectivament. Així, es poden estudiar també les situacions de congestions en els carrils d'entrada i de sortida, i la simulació del trànsit a les Rondes és més real. S'ha triat una longitud prudencial de 50 metres

ja que tots els accessos disposen d'un mínim d'aquesta distància i és suficient per emmagatzemar alguns vehicles en cas de trànsit dens. La unió exacta entre cada entrada i sortida amb les Rondes serà estudiada un cop el fitxer estigui en format “.net.xml”.

Tot i haver resolt d'aquesta manera totes les entrades i sortides de les Rondes, resta definir els enllaços entre les dues Rondes. Aquests es troben al Nus de la Trinitat i al Nus del Llobregat.

A la següent imatge es pot veure en detall com s'ha unit la Ronda Litoral amb la Ronda de Dalt al Nus de la Trinitat.



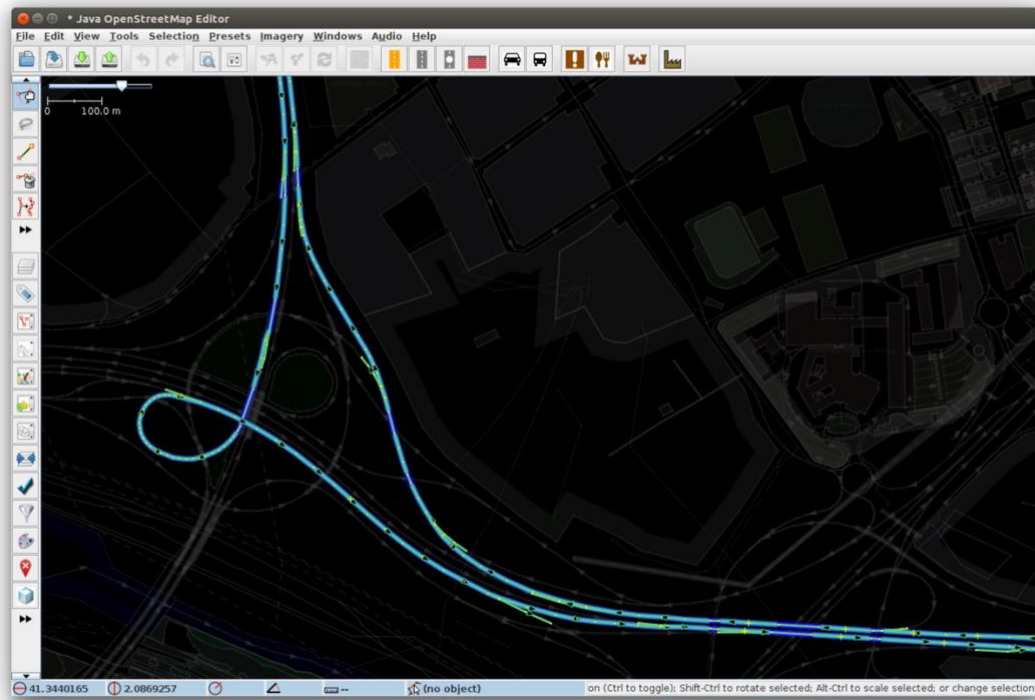
*Il·lustració 9. Nus de la Trinitat al JOSM (Font pròpia)*

La Ronda de Dalt (a la part inferior esquerra de la imatge) segueix el seu transcurs en direcció nord-est un cop travessat el Nus de la Trinitat passant a formar l'anomenada Pota Nord (a la imatge es pot veure representat amb diverses vies ombrejades a la part superior dreta). La Ronda Litoral (a la part inferior dreta de la imatge) segueix el seu transcurs en direcció nord un cop travessat el Nus de la Trinitat canviant el seu nom per C-58 (a la imatge es pot veure representat amb diverses vies ombrejades a la part superior). Es pot comprovar doncs que les Rondes no estan directament unides i és necessari utilitzar altres vies per enllaçar-les.



D'aquesta manera, s'han utilitzat les sortides adients per enllaçar una Ronda amb l'altre utilitzant el camí més curt possible. Aquest recorregut és el que seguiria un vehicle en la realitat seguint les indicacions de la senyalització viària.

A la següent imatge es pot veure en detall com s'ha unit la Ronda Litoral amb la Ronda de Dalt al Nus del Llobregat.



*Il·lustració 10. Nus del Llobregat al JOSM (Font pròpia)*

La Ronda de Dalt (a la part superior de la imatge) segueix el seu transcurs en direcció sud-oest un cop travessat el Nus del Llobregat passant a formar l'anomenada Pota Sud (a la imatge es pot veure representat amb diverses vies ombrejades a la part inferior esquerra). La Ronda Litoral (a la part inferior dreta de la imatge) segueix el seu transcurs en direcció nord-oest un cop travessat el Nus del Llobregat canviant el seu nom per A-2 o E-90 (a la imatge es pot veure representat amb diverses vies ombrejades a la part esquerra). Es pot comprovar doncs que les Rondes no estan directament unides i és necessari utilitzar altres vies per enllaçar-les. D'aquesta manera i d'igual forma que al Nus de la Trinitat, s'han emprat les vies necessàries per enllaçar-les.

Més endavant seran detallades quines vies exactament s'han utilitzat en els dos enllaços de les Rondes.

### 3.3.4. Compatibilitat del format

Un cop que el circuit de les Rondes ha quedat definit completament, s'ha procedit a convertir l'arxiu en format *“.osm”* al format compatible amb SUMO que és *“.net.xml”*. Aquest procediment és senzill, ja que com s'ha comentat anteriorment SUMO incorpora una eina anomenada NETCONVERT que permet transformar pràcticament qualsevol tipus de fitxer amb dades geogràfiques vectorials en un fitxer amb domini *“.net.xml”*. Aquesta eina no disposa d'interfície d'usuari i s'ha d'utilitzar mitjançant comandes a la terminal. L'ordre a executar per convertir un fitxer amb format *“.osm”* és la següent:

```
netconvert --osm [nom del fitxer].osm --output [nom del fitxer].net.xml
```

Evidentment, és necessari que el fitxer que volem convertir estigui en el directori en el que la terminal es troba o que s'indiqui el camí a aquest. El fitxer creat apareixerà en el mateix directori i es pot triar el nom que sigui indistintament.

Degut a que no tots els formats contenen la mateixa informació i és possible que SUMO necessiti determinades característiques de la xarxa per funcionar que no són present al fitxer d'origen, SUMO prendrà valors per defecte per a aquestes característiques. És possible especificar aquestes característiques perquè NETCONVERT les tingui en compte durant el processat del fitxer. En el context d'aquest treball ha calgut especificar dues condicions. La primera deshabilita l'opció de poder canviar de sentit en una mateixa via fent un gir de 180°. Això és així degut a que no es pot realitzar cap canvi de sentit a les Rondes, és necessari utilitzar una sortida i l'entrada corresponent en sentit contrari. La segona deshabilita l'opció de connectar arestes que es troben en paral·lel, cada aresta ha d'estar connectada amb la aresta que li segueix immediatament tant per davant com per darrere. Això és així degut a que a les Rondes no existeix cap connexió directa entre els dos sentits. A continuació es troba l'ordre completa que es deuria executar:

```
netconvert --osm [nom del fitxer].osm --output [nom del fitxer].net.xml --no-left-connections=true --no-turnarounds=true
```

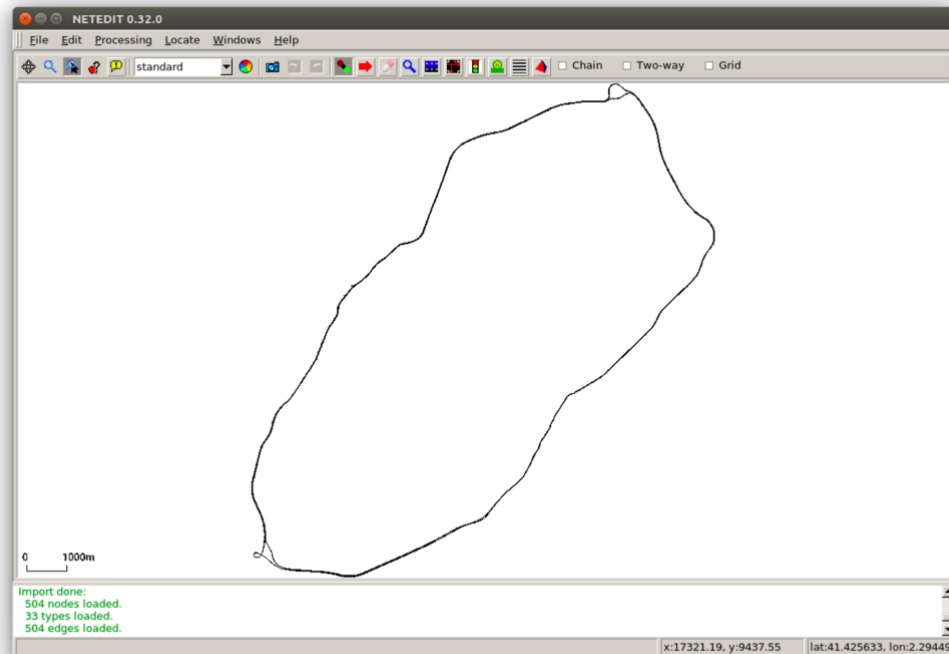
Per defecte aquestes dues condicions estan desactivades. És important considerar-les ja que la xarxa que s'obtingui no serà correcte en fer el contrari.

### 3.3.5. Revisió final

El fitxer obtingut seguint el procediment explicat és ara en format *“.net.xml”* i per tant SUMO el pot llegir i utilitzar per a dur a terme simulacions. Tot i això, s'ha pres la mesura cautelar de

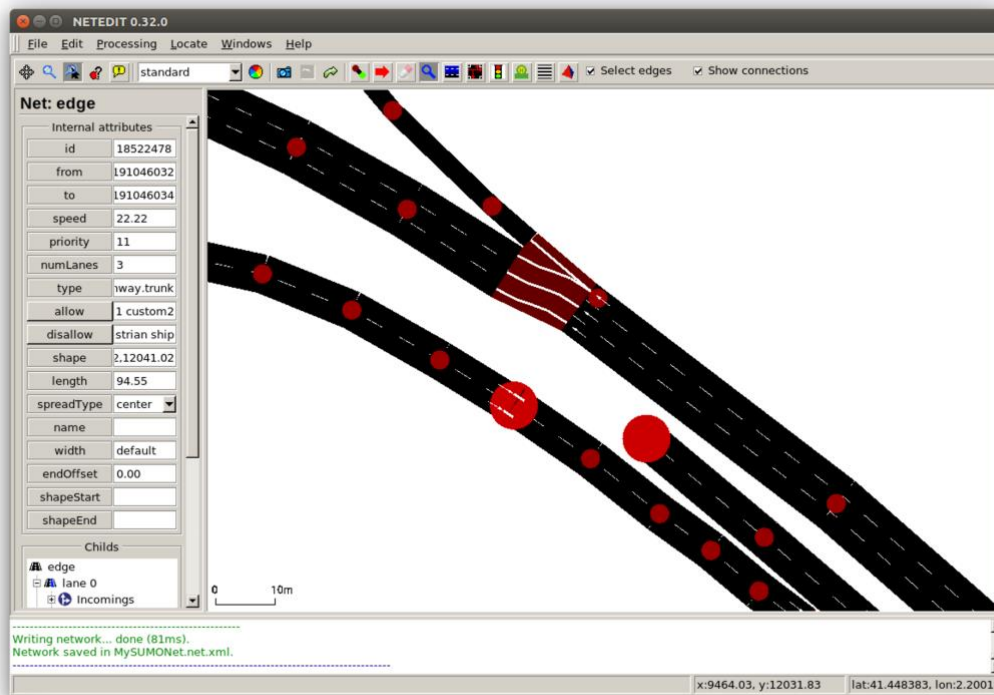
revisar en detall tot el circuit de les Rondes en busca d'errors o imperfeccions.

Per poder visualitzar la xarxa s'utilitzarà l'aplicació que SUMO incorporà anomenada NETEDIT. Mitjançant aquesta eina es poden visualitzar i editar tots els aspectes de la xarxa mitjançant una interfície gràfica d'usuari.



Il·lustració 11. Vista general de les Rondes amb NETEDIT (Font pròpia)

A la següent imatge es pot veure en detall un tros de les Rondes. A diferència de JOSM per editar arxius “.osm”, amb NETEDIT veiem el nombre de carrils en una representació més realista. Els punts vermells més grans representen nodes, i les arestes les veiem en forma de via amb l'amplada corresponent al nombre de carrils que s'hagi definit. Els punts vermells més petits serveixen per donar forma a les arestes. A la imatge també es veu una sortida de les Rondes i l'enllaç d'aquesta amb la via principal. Aquest aspecte serà tractat en detall més endavant. A la part esquerra de la imatge, trobem tots els atributs d'una aresta que ha sigut seleccionada mitjançant el mode d'inspecció. Es pot comprovar com tots els atributs que apareixen són els que s'han mencionat prèviament en aquest treball, i apareixen emplenats els obligatoris i aquells d'opcionals que han sigut necessaris. Aquests paràmetres es poden editar directament des de la interfície, però cal tenir en compte que el programa no ens deixarà utilitzar qualsevol valor per a cada camp. Per a que els canvis prenguin efecte, és necessari desar el fitxer. Fins que això no es faci no veurem els canvis en el programa.



*Il·lustració 12. Mode d'inspecció del NETEDIT (Font pròpia)*

Un cop entès el funcionament bàsic del NETEDIT, s'ha procedit a revisar els següents aspectes:

- Tots els accessos de les Rondes estan presents i en les ubicacions corresponents.
- El nombre de carrils és l'adequat en tots els trams i accessos.
- El límit de velocitat a cada tram és el correcte.
- Les prioritats en cas de canvi de número de carrils corresponen amb la realitat
- La longitud de tots els accessos es de 50m.

Per revisar aquests aspectes s'ha utilitzat principalment el servei de mapes online de Google Maps [7]. Mitjançant aquesta web, es poden mesurar distàncies entre diferents punts d'un mapa, es poden veure imatges per satèl·lit amb un alt nivell de detall i es poden recórrer veient vistes panoràmiques completes dels mateixos mitjançant l'aplicació incorporada anomenada

Street View. Degut a que les dades del servidor de Google Maps provenen de diferents fonts que les del servidor d'OpenStreetMap (d'on inicialment s'han obtingut les dades), s'obté un resultat més rigorós comparant la xarxa final amb la de Google Maps sempre i quan tot coincideixi. De totes formes, ambdós serveis són reconeguts per la seva precisió, exactitud i detallisme.

Degut a la utilització de diferents fonts de dades per a la mateixa informació, és important saber quan aquestes dades van ser recopilades per cadascuna de les fonts. És possible que en el transcurs del temps la configuració de la xarxa hagi canviat, i això podria donar lloc a incongruències. Les dades descarregades del servidor OpenStreetMap daten del 8 de juliol 2018. Degut a que les dades del mapa s'actualitzen cada pocs minuts i tots els canvis realitzats per usuaris són aplicats, la data de les dades és just el moment en que van ser descarregades. Les dades de la vista per satèl·lit del servidor de Google Maps daten del 2018. No existeix més precisió en aquesta data ja que són requerits diferents satèl·lits i en diferents intervals de temps per fotografiar les Rondes al complet. Aquestes dades provenen de l'Institut Geogràfic Nacional, de l'Institut Cartogràfic de Catalunya i dels servidors de Google. Les dades de la vista a peu de carrer de Street View són generades de manera diferent. La forma de recopilar aquestes dades és mitjançant un vehicle especialitzat que recorre les vies a fotografiar. Aquest procés requereix d'un període de temps considerable, i és per això que les dades de les Rondes d'aquest servei daten d'entre maig i setembre del 2017. Vista la discrepància entre el temps d'actualització de les diferents dades s'ha valorat l'opció de que aquestes dades hagin canviat durant aquests períodes. Tot i això, segons la web del Servei d'Informació d'Obres de l'Ajuntament de Barcelona, les úniques obres que s'han produït en aquest temps no han involucrat el canvi de cap dels aspectes que s'estan revisant en aquest apartat. Per tant, és possible comparar les dades de cadascuna de les fonts i la xarxa a utilitzar al SUMO hauria de coincidir amb totes.

Per dur a terme la revisió s'ha realitzat un procés molt metòdic: s'ha recorregut el mapa amb vista per satèl·lit de Google Maps a la vegada que es recorria la xarxa des de la interfície de NETEDIT. En alguns casos, ha calgut també consultar la vista del Street View. D'aquesta manera, cadascun dels trams de la xarxa ha sigut revisat meticulosament. Aquesta tasca pot resultar feixuga però garanteix que totes les dades coincideixen.

A la següent imatge es pot observar una comparativa entre els tres punts de vista.





*Il·lustració 13. Comparativa de la vista de NETEDIT, Google Maps i Street View (Font pròpia / Font: Google Maps)*

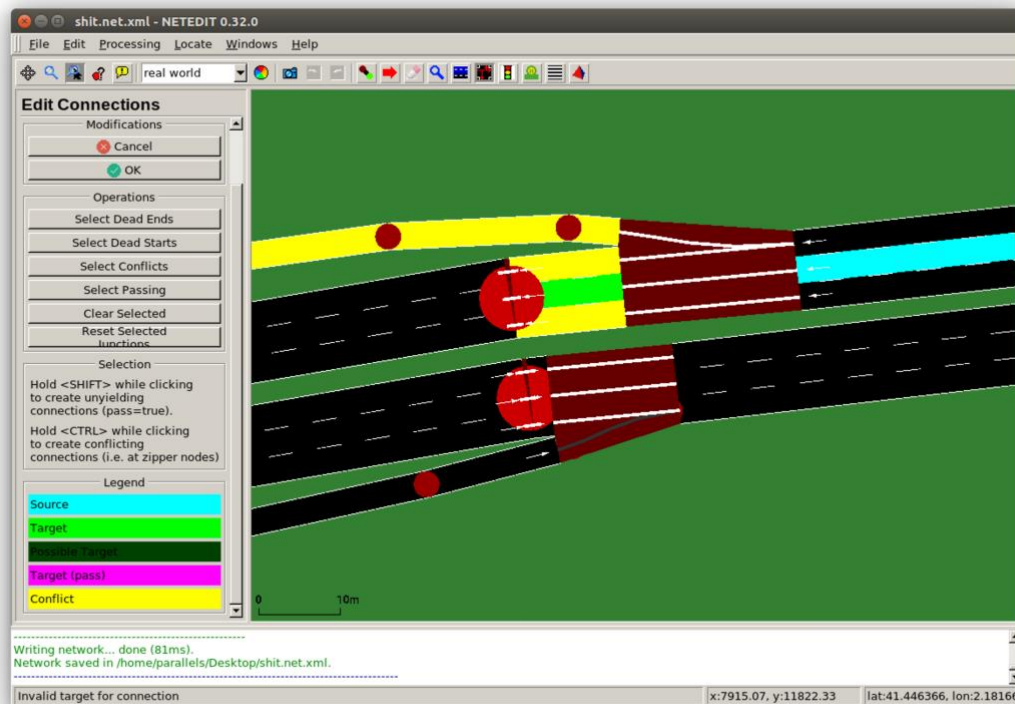
Durant aquesta comprovació, s'han hagut de realitzar petits ajustos, però tots els accessos estaven presents a la xarxa del SUMO i en la posició corresponent. Per tant aquest queda comprovat i confirmat que és correcte.

El nombre de carrils ha coincidit també al llarg de totes les Rondes i en tots els accessos exceptuant alguns casos puntuals. Per a accessos de les Rondes amb un carril d'incorporació o de sortida molt llarg, les dades d'OpenStreetMap el comptaven com un carril més de la via principal al llarg de l'accés. D'altra banda, SUMO tracta els carrils d'incorporació i de sortida dins de nodes, anomenats encreuaments. Per tant, no és correcte afegir carrils a la via principal, sinó que aquest aspecte s'ha de resoldre al propi encreuament. Un encreuament és un node que connecta dues o més arestes i requereix de configuració per a les unions entre carrils. Per exemple, un node que uneix dues arestes de tres carrils cadascuna on cada carril està connectat únicament amb el que el segueix, no és considerat un encreuament. Únicament hi ha dos casos en els que es troben encreuaments en la xarxa de les rondes. Cada node de les rondes que uneix la via principal amb un accés, és considerat un encreuament, ja que ha d'unir tres arestes i hi estan involucrats canvis de carril i prioritats en la circulació. El node que es troba a la via principal entre dues arestes que tenen un nombre diferent de carrils, també es considerat un encreuament, ja que és necessari definir els canvis de carril. Aclarit aquest aspecte, s'han eliminat els carrils que representaven vies d'incorporació o de sortida de les rondes a les arestes involucrades, i s'explicarà com s'han editat els encreuaments més endavant. Amb aquest canvi, el nombre de carrils al llarg de les Rondes i a tots els accessos coincideix.

Per a comprovar el límit de velocitat a cada tram de les Rondes, s'ha partit de la hipòtesi que en la majoria dels trams de les Rondes el límit es de 80km/h. Degut a la dificultat de comprovar el límit de velocitat a totes les arestes de la xarxa, només s'ha comprovat a diferents punts aleatoris. Primerament s'ha utilitzat la informació relativa als radars fixos que hi ha per les Rondes per comprovar que el límit de velocitat a cada aresta on hi ha un radar fix correspon amb la velocitat que te configurada el radar. Aquesta informació és de caràcter públic i és pot consultar a l'aplicatiu Infotransit [8] del RACC. Altrament, utilitzant les imatges de Street View, sempre que s'ha visualitzat una senyal amb un límit de velocitat s'ha comprovat que l'aresta de que es troba a la mateixa zona el respecti. Donat que tots els punts que s'han comprovat han tingut el límit de velocitat ben configurat, s'ha assumit que el conjunt de la xarxa el té ben configurat també. Realment, les dades provenen d'OpenStreetMap, i com a proveïdor de dades fiable haurien de ser correctes. Cal també remarcar que en aquesta simulació no s'ha tingut en compte cap límit de velocitat variable. Les senyals digitals que canvien el límit de velocitat d'algun tram de les Rondes en determinats moments no han estat afegides en aquesta xarxa.

Per revisar les prioritats en els canvis de carril cal entendre primerament com funcionen els encreuaments al SUMO. Els encreuaments tenen exactament els mateixos atributs que un node i són tractats de la mateixa forma. La única diferència és que inclouen informació respecte a com enllaçar cada carril. Abans de revisar les prioritats, cal comprovar les connexions dels carrils. NETEDIT disposa d'una eina per editar les connexions i a la següent

imatge podem veure el seu funcionament. Per cada carril entrant a un encreuament, es pot triar a quin carril de sortida es vol connectar, permetent connexions múltiples.



*Il·lustració 14. Mode per editar encreuaments al NETEDIT (Font pròpia)*

Els encreuaments apareixen al NETEDIT amb formes molt diverses i en color vermell fosc. Segons l'eina que s'estigui utilitzant, es poden representar les unions entre els carrils amb línies blanques contínues. A la imatge es pot comprovar com a l'encreuament superior el carril central abans de l'encreuament està connectat únicament amb el carril central després de l'encreuament. En canvi, el carril de la dreta està connectat a dos carrils. En quant a les prioritats, aquestes venen definides per un atribut de les arestes. En el cas que dos carrils diferents esdevinguin un, tindrà prioritat aquell carril que provingui de l'aresta amb un valor més alt a l'atribut de prioritat. D'aquesta manera, a l'encreuament inferior de la imatge, el carril que s'incorpora a la via principal per la dreta té una prioritat inferior al carril que ja es troba a la via principal. Per tant, els vehicles que accedeixin a la via principal per aquest carril cediran el pas als vehicles que ja s'hi troben. És per això que la unió entre aquests carrils apareix en un to més fosc, ja que existeix una altre unió per al carril de destí involucrat amb més prioritat. Per a l'encreuament superior totes les unions apareixen de color blanc ja que no hi ha cap



carril de destí connectat a més d'un carril d'origen. Aclarit aquest aspecte, s'ha revisat que a tots els encreuaments les prioritats estiguessin ben configurades comparant la xarxa amb les imatges per satèl·lit del Google Maps. En aquestes imatges es poden veure els senyals que indiquen cedir el pas pintats a l'asfalt de la calçada.

Altres atributs importants dels encreuaments són la forma i el radi. La forma es pot definir indicant les coordenades dels punts que limiten l'encreuament, i aquest tindrà la forma del polígon que descriu els punts. El radi defineix el radi de curvatura en passar d'una aresta a la consegüent. Ambdós valors són editables fàcilment amb l'eina d'inspecció del NETEDIT. Per a la xarxa de les Rondes, tots els encreuaments havien sigut ben importats en aquest aspecte, exceptuant els encreuaments mencionats anteriorment que disposaven de carrils d'incorporació o de sortida massa llargs. Per a aquests encreuaments, ha calgut modificar els atributs per representar correctament l'encreuament. D'aquesta manera, es diferencien accessos amb carrils d'incorporació llargs on els vehicles tenen molt temps per incorporar-se a la via amb carrils d'incorporació curts o nuls on els vehicles entren directament a la via.

Finalment, s'ha editat la longitud de totes les entrades i sortides de les Rondes per tal de que mesurin exactament 50m i estiguin formades únicament per una aresta. D'aquesta manera, i en el cas de voler mesurar els vehicles que entren o surten per cada accés, totes les vies tindran les mateixes condicions. El valor de 50m ha sigut escollit ja que tots els accessos disposen d'un carril continu amb aquesta distància. En el cas d'utilitzar una distància major existeix el risc de que alguns carrils esdevinguin carrers de la ciutat travessant rotondes o altres encreuaments.

### **3.3.6. Documentació del resultat**

El resultat dels procediments anteriors és una xarxa que representa les Rondes de Barcelona amb molta precisió. Tot i això, abans de realitzar simulacions de trànsit en aquest escenari, cal documentar determinats elements de la xarxa per a poder-los utilitzar durant la simulació.

Segons com es defineixi la simulació posterior, caldran unes dades o unes altres. Independentment d'això, hi ha elements que obligatòriament és necessitaran documentar. Aquests elements són les arestes que representen els accessos a les Rondes, ja que els vehicles de la simulació hauran d'entrar i sortir per el lloc que els hi correspon. Donat el cas que les dades del trànsit per a la simulació poden estar en multitud de formats i amb diversa informació, és important documentar amb el màxim detall possible aquestes arestes. Així es podran relacionar les dades del trànsit amb la xarxa i els posteriors resultats de la simulació de manera senzilla.

A l'annex d'aquest treball es pot trobar una taula amb tots els accessos de les Rondes llistats. A continuació es defineix el contingut que es troba a cada columna començant per la primera

columna d'esquerra a dreta:

1. Donat que les Rondes unides formen un anell, en aquesta columna trobem el sentit en el que es recorre aquest anell seguint el sentit del trànsit.
2. A la segona columna s'han numerat tots els accessos de les rondes començant pel Nus de la Trinitat i recorrent l'anell complet tant en un sentit del trànsit com en l'oposat.
3. No totes les vies d'aquesta simulació pertanyen a la Ronda de Dalt o a la Ronda Litoral, ja que per unir-les al Nus de la Trinitat i al Nus del Llobregat ha calgut utilitzar altres vies. En aquesta columna apareix el nom de la via. En cas de ser una via d'unió entre les dos Rondes, el valor d'aquesta columna és "Transició".
4. A la quarta columna es troba el sentit de la Ronda. Els únics dos valors possibles són "Llobregat" i "Besòs". Aquesta és la nomenclatura que utilitza l'Ajuntament de Barcelona en la senyalització de la ciutat.
5. En aquesta columna s'indica si l'accés és una entrada o una sortida. Es considera entrada una aresta amb una única connexió al seu final i es considera sortida una aresta amb una única connexió al seu inici. Totes les demás arestes de la xarxa estan connectades per ambdós extrems i son trams de les vies principals de les Rondes o formen part de les transicions al Nus de la Trinitat o al Nus del Llobregat. També s'han llistat les entrades i sortides de les Rondes que són realment entrades i sortides però no segueixen aquest criteri, és a dir, a la xarxa estan connectades pels ambdós extrems. Aquestes arestes son les arestes que es troben als trams de transició i apareixen en aquesta columna com a entrades o sortides entre asteriscs. Per últim, afegir que l'inici i el final de les vies principals de les Rondes també apareixen com a entrades i sortides ja que les seves arestes tenen un dels extrems lliures. Tot i utilitzar aquest terme, a la realitat les vies principals de les Rondes seguirien el seu transcurs per aquests trams.
6. A la sisena columna es troba el número de l'entrada o la sortida de les Rondes. Aquesta informació s'ha trobat a les tres fonts de dades mencionades anteriorment. Hi ha accessos que no estan numerats i apareix un guió com a caràcter en el valor d'aquesta columna. A la següent imatge es pot veure indicat tant el número d'un accés com el sentit de les Rondes.



*Il·lustració 15. Imatge d'una entrada de les Rondes (Font: Google Maps)*

7. Correspondent al número de l'accés, en aquesta columna es troba el nom de l'accés. Remarcar que segons la senyalització de la ciutat només les sortides tenen nom. És comú anomenar les entrades que coincideixen amb la numeració de les sortides de igual manera, però no és el cas en aquest document. Per tant, les entrades i altres accessos sense nom apareixen amb un guió com a valor en aquesta columna.
8. A la vuitena columna apareix l'identificador de l'aresta corresponent. Aquesta columna conté informació molt útil, ja que tant en la configuració de la simulació del trànsit com en l'anàlisi dels resultats de la simulació pot caldre referenciar alguna d'aquestes arestes i l'única manera de fer-ho al SUMO és mitjançant els seus identificadors.
9. La novena columna completa la sisena i la setena aportant detalls sobre l'entrada i la sortida en qüestió. Aquesta informació s'ha obtingut únicament de la senyalització de la via, i aquesta s'ha consultat mitjançant la vista de Street View. A continuació trobem una imatge on es pot observar tant el número com el nom i la informació addicional d'una sortida de les Rondes.



*Il·lustració 16. Senyalització d'una sortida de les Rondes (Font: Google Maps)*

10. La darrera columna només està emprada per als accessos que requereixen d'algun tipus de detall extra a afegir. Els comentaris informen sobre vies de transició o inici o final de les vies principals de les Rondes.

Tant la xarxa de les Rondes en format “*.net.xml*” com la taula amb la informació sobre cada accés de les Rondes es poden trobar al següent repositori de la plataforma GitHub:

<https://github.com/MarcVilaUPC/TFG>

Aquesta plataforma permet crear projectes públics de manera gratuïta i que siguin de lliure accés per a qualsevol usuari. No és necessari estar registrat a la plataforma per poder veure o descarregar els fitxers mencionats.

## 4. El trànsit a les Rondes

Les Rondes són transitades diàriament per centenars de milers de vehicles. Per a dur a terme aquest treball, ha calgut recopilar dades exactes sobre aquest trànsit. Donada la gran extensió de la xarxa i la magnitud de les dades a recopilar, és impossible obtenir aquestes dades per mitjans propis i cal recórrer a alguna entitat que hagi realitzat estudis prèviament tot mesurant aquestes dades.

El procés de recerca s'ha dividit en dues parts. Per una banda, s'ha considerat l'opció de que aquestes dades estiguin publicades i siguin d'accés lliure. D'altra banda, s'ha considerat la possibilitat de que aquestes dades no estiguin publicades i per tant calgui contactar personalment alguna entitat relacionada amb el trànsit a Barcelona amb l'objectiu d'obtenir així les dades del trànsit de les Rondes. Inicialment, no s'ha considerat l'opció que no existeixin dades del trànsit a les Rondes. S'entén que poden existir dades més precises o menys, i en funció d'això dependrà el realisme de la simulació duta a terme en aquest treball.

Les entitats (tant públiques com privades) que tenen relació amb el trànsit de les Rondes apareixen llistades a continuació:

- Servei Català de Trànsit (SCT). Aquesta entitat pública és part de la Generalitat de Catalunya i actua com a gestor del trànsit i la seguretat viària a Catalunya. Donat que el seu principal objectiu és reduir tant la freqüència com la gravetat de sinistres ocasionats en la xarxa viària catalana, és possible que disposin de dades detallades del trànsit.
- Reial Automòbil Club de Catalunya (RACC). Tot i ser una entitat privada i els seus principals productes i serveis siguin assegurances, assistències en carretera, tallers mecànics i cursos de conducció, RACC disposa d'un departament conegut com Fundació RACC que duu a terme una intensa activitat en favor de la seguretat viària. Aquest motiu permet pensar que RACC pot disposar també de dades del trànsit a les Rondes.
- Àrea Metropolitana de Barcelona (AMB). A part de fer referència a una zona geogràfica, l'Àrea Metropolitana de Barcelona és una administració pública que té entre les seves competències la planificació territorial, l'urbanisme, la mobilitat i el transport. Donat que l'àrea d'efecte d'aquesta entitat és major a la de l'Ajuntament, és possible que disposin de dades del trànsit a les entrades de la ciutat que l'Ajuntament no té.
- Ajuntament de Barcelona. Aquesta entitat pública disposa de responsabilitat política a la ciutat de Barcelona. A part de l'acció de govern, també s'encarrega de diverses



gestions de la ciutat. L'Ajuntament consta de diversos departaments, entre els quals el Departament de Regulació del Trànsit o la Direcció de Serveis de Mobilitat podrien tenir estudis del trànsit a les Rondes.

És important remarcar que el procés d'obtenció de dades del trànsit no va ser posterior al disseny del model de les Rondes sinó simultani. Igualment, han calgut coneixements sobre la funcionalitat de les simulacions al SUMO mentre es cercaven les dades. Això ha sigut així ja que el format de les dades pot condicionar la manera en que es realitza la simulació. Per tant, és necessari conèixer quina estructura poden tenir les dades per dissenyar una xarxa al SUMO a la qual es puguin introduir aquestes dades mitjançant el tipus de simulació del que disposa.

## 4.1. Dades generals públiques

Seguint l'estratègia mencionada, s'ha iniciat el procés d'obtenció de les dades realitzant una cerca general a les pàgines web de les entitats mencionades i a biblioteques i dipòsits de dades.

El Servei Català de Trànsit disposa d'un mapa continu del trànsit a la seva pàgina web [9] on es mostra segons un codi de colors la intensitat del trànsit a algunes vies de Catalunya, entre les quals es troben les Rondes de Barcelona i els seus accessos. Aquest codi de colors no és suficient per a aquest projecte, però evidencia que el Servei Català de Trànsit mesura d'alguna forma el trànsit de les Rondes.

El RACC també disposa d'un aplicatiu semblant anomenat "Infotransit" on també es mostra l'estat de la circulació a les Rondes amb un codi de colors, per tant es poden extreure les mateixes conclusions. D'altra banda, a la web de la Fundació RACC existeix una secció on diversos estudi i informes hi són publicats, entre els quals auditories que diverses entitats públiques sol·liciten al RACC. Tot i això, la documentació existent té un enfocament més aviat econòmic o centrat en la contaminació. Dins d'alguns d'aquests estudis apareixen dades singulars sobre el trànsit a les Rondes, com per exemple una caracterització dels vehicles que hi circulen o estudis de la congestió als corredors d'accés a Barcelona. Aquestes dades no són suficients per a aquest treball però evidencien una vegada més que RACC disposa d'algun sistema de mesura del trànsit en algun tram de les Rondes o que alguna altra entitat li cedeix aquesta informació.

L'Àrea Metropolitana de Barcelona disposa a la seva web de quaderns de mobilitat per a cada població dins de la zona amb informació detallada del trànsit i els desplaçaments. Tot i això

Barcelona no apareix a cap d'aquests quaderns ja que és l'Ajuntament qui és responsable de publicar aquesta informació.

L'Ajuntament de Barcelona publica anualment un informe amb el nom de "Dades bàsiques de Mobilitat" on apareix informació sobre el trànsit a les Rondes. Aquesta informació és igualment de caràcter general, tot tractant el trànsit per cada Ronda amb una única lectura global i no estratificant per cada accés o tram de les Rondes. A part d'aquest informe, l'Ajuntament publica a la seva web en la secció de dades de la ciutat un anuari estadístic [10] [11]. Dins de la informació que es pot trobar en aquest anuari apareix el volum de trànsit mitjà a les Rondes. Aquesta informació és útil com a guia però no per una simulació detallada com la que es vol realitzar.

Un cop realitzada la primera cerca a les pàgines web de les entitats responsables de l'estudi del trànsit a Barcelona, s'ha procedit a buscar informació en articles o revistes publicades en el passat. S'han consultat principalment tres bases de dades: la Xarxa de Biblioteques Municipals, la Biblioteca de Catalunya i el Catàleg Col·lectiu de les Universitats de Catalunya.

A la Xarxa de Biblioteques Municipals, concretament les Biblioteques de Barcelona, no disposen de cap tipus d'informació tan detallada sobre les Rondes. Existeix la possibilitat de que la biblioteca de cada districte emmagatzemi informació detallada d'aspectes del districte, com per exemple dels accessos de les Rondes que estiguin dins del districte, però no ha sigut el cas. Alternativament, a la biblioteca Francesc Candel disposen d'un fons especialitzat en vehicles. Tot i això, no disposen de dades del trànsit.

La Biblioteca de Catalunya emmagatzema tot tipus d'articles i revistes físicament des de la seva creació. Donat que la majoria d'estudis actuals es publiquen electrònicament, la Biblioteca de Catalunya disposa bàsicament d'edicions anteriors d'estudis mencionats anteriorment en aquest treball en format físic. Per a la simulació d'aquest treball són necessàries dades recents, per tant es descarta qualsevol referència anterior al 2017.

A la pàgina web del Catàleg Col·lectiu de les Universitats de Catalunya es poden cercar treballs i tesis realitzades en el marc educatiu català i consultar el seu contingut. Malauradament, no existeix cap treball on hi constin dades detallades del trànsit a les Rondes abans de la realització d'aquest treball.

## 4.2. Sol·licitud d'informació

Les dades publicades respecte al trànsit de les Rondes no són suficients per a dur a terme una simulació realista. Tot i haver trobat informació detallada d'alguns aspectes del trànsit en diversos articles realitzats per diferents autors i repartits en un període de temps considerable, no és viable realitzar la simulació amb la unió d'aquestes dades.

Basant-se en la informació trobada fins ara, s'ha considerat aleshores l'opció que les dades existeixen i són de caràcter públic, però no es troben publicades en cap medi digital ni físic de lliure accés. Per aquest motiu s'ha contactat personalment a les diferents entitats involucrades realitzant consultes, tràmits i instàncies amb el fi d'obtenir les dades necessàries.

Primerament, remarcar que les fonts d'informació contactades no han proporcionat sempre respostes clares i en alguns casos aquestes han sigut contradictòries. Seran relatats únicament els aspectes que s'han confirmat que són certs.

Inicialment es va realitzar un tràmit al Servei Català de Trànsit a través del telèfon d'atenció al ciutadà de la Generalitat de Catalunya (012). Per llei, disposen de fins a 90 dies hàbils per a donar una resolució a la gestió. Donat aquest cas, es va procedir a contactar directament amb les oficines centrals del Servei Català de Trànsit via telefònica al seu telèfon d'atenció al públic (93 567 40 00). Casualment, durant aquesta trucada es va facilitar el correu electrònic de contacte d'un tècnic que podria facilitar les dades i agilitzar el tràmit. El tècnic va ser contactat i després d'especificar el període de temps del que es necessitaven les dades, aquestes van ser facilitades. Al següent apartat d'aquest treball s'explicarà el format de les dades i com aquestes s'han analitzat. No ha sigut possible compartir aquestes dades en aquest treball degut a que el SCT n'és el propietari. Tot i això, un petit extracte de les dades és mostrarà en el proper apartat amb l'objectiu d'entendre l'estructura d'aquestes i no de compartir la informació que contenen. Si el lector necessita aquestes dades, l'única forma d'obtenir-les és contactant directament amb el SCT i demanant les lectures dels aforadors.

El RACC també va ser contactat a través del seu telèfon d'atenció gratuït (900 357 357). La informació obtinguda a la trucada va ser que RACC no s'encarrega del model de l'Ajuntament, i que l'única informació de caràcter públic de la que disposen (recordem que RACC és una entitat privada) es troba a la seva pàgina web com bé s'ha comentat a l'apartat anterior.

L'Àrea Metropolitana de Barcelona va ser contactada a través del seu telèfon d'atenció al públic (932 23 51 51) i també per correu electrònic (info@ambmobilitat.cat). També va ser possible contactar amb el Director Tècnic del contracte de manteniment de les Rondes a AMB. La resposta rebuda comunicava que AMB únicament gestionava determinades infraestructures de les Rondes, i que l'Ajuntament de Barcelona disposava de dades del trànsit a les Rondes, concretament Gerència de Mobilitat i Infraestructures.

L'Ajuntament de Barcelona va ser contactat via telefònica al seu telèfon d'atenció al ciutadà (010) i també es va acudir a una Oficina d'Atenció al Ciutadà per presentar una instància davant les complicacions que suposaven les trucades telefòniques. Després de diverses trucades a l'Ajuntament, es va concloure que si existia la informació sobre les Rondes aquesta



la tindria o bé el Departament de Regulació del Trànsit, o Direcció de Serveis de Mobilitat (possiblement AM es referia a aquest departament) o el Departament d'Estadística i Funció de Dades. Tots tres departaments van ser contactats telefònicament i personalment a les seves oficines. Tot i això, cap d'ells atén al públic i és complicat contactar-los via telefònica. El Departament de Regulació del Trànsit va respondre telefònicament (93 402 34 06) que ells només gestionaven el funcionament dels semàfors i gestionaven accidents. Direcció de Serveis de Mobilitat va comunicar telefònicament (93 291 45 75 i 93 402 39 67) que ells eren el departament de l'Ajuntament que disposava de les dades requerides. Per obtenir aquesta informació calia realitzar una instància a l'Ajuntament i dos correus electrònics de contacte van ser facilitats per tal d'agilitzar els tràmits: el correu del departament ([mobilitatbcn@bcn.cat](mailto:mobilitatbcn@bcn.cat)) i el correu personal d'un empleat del departament. Tot i contactar a través dels correus electrònics, cap resposta profitosa va ser rebuda. El Departament d'Estadística i Funció de Dades va ser contactat telefònicament (93 402 71 46 i 93 256 53 90). Personal del Departament va facilitar per correu electrònic la informació ja coneguda de l'anuari estadístic publicat a la web de l'Ajuntament. A més a més, també es va comunicar que Direcció de Serveis de Mobilitat era qui proveïa d'aquestes dades al departament. Finalment, és va realitzar la instància personalment a l'Ajuntament, a l'Oficina d'Atenció al Ciutadà. Aquesta instància va ser resposta i donada per solucionada a través d'un correu electrònic que redirigia novament a l'anuari estadístic de la web de l'Ajuntament. Donades les complicacions que presentava realitzar tràmits amb l'Ajuntament, es va donar aquesta via per tancada.

Alternativament a aquestes entitats, una font de dades que va ser contactada personalment ha proporcionat anònimament dades detallades sobre el trànsit de les Rondes.

### 4.3. Anàlisi de les dades

Finalment, es disposa de dades detallades sobre el trànsit de les Rondes provinents del Servei Català de Trànsit i d'una font anònima. En aquest apartat es durà a terme un anàlisi de les dades per tal d'entendre tota la informació proveïda i es farà un filtratge d'aquestes dades per tal d'obtenir la informació necessària per a la simulació. Com bé s'ha explicat anteriorment, cal conèixer com realitzar simulacions amb SUMO abans de filtrar les dades per tenir clar quina informació es realment necessària.

El Servei Català de Trànsit va facilitar lectures de molts punts repartits per tot el transcurs de les Rondes. Aquestes dades són obtingudes mitjançant uns dispositius anomenats aforadors de secció. Aquests dispositius es troben o bé a la pròpia calçada o al lateral de la via, i utilitzen la tecnologia d'espira de camp magnètic per recollir dades. Concordant amb el període de temps pel que ha sigut validat el mapa de les Rondes importat al SUMO, es van demanar totes les lectures dels aforadors del mes de Maig tant del 2017 com del 2018. Es va proporcionar aquesta informació en format ".csv" i en format ".rdata". Donat que els dos

formats contenen exactament la mateixa informació, s'ha utilitzat el fitxer “.csv” i s'ha tractat amb el programa Excel per comoditat. A la taula següent es pot observar el format en el que es troben les dades.

SECTION_CODE	ali	via	pk	sen	senCreDec	nCar	tipEquip	velFFSec	dat	int	vel	ocu	com	err	agrTem	camares
421010	12-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	9,5	Besos	cre	3	SMD	80	10/05/2017 10:00:00	3027	78	8	100	0	hora	0
421049	E06B INI Rampa	R. DALT	9,7	Besos	cre	1	SMS	NA	10/05/2017 10:00:00	1820	NA	18	NA	0	hora	0
421051	E06B Lateral	R. DALT	9,705	Besos	cre	2	SMS	NA	10/05/2017 10:00:00	674	NA	9	NA	0	hora	0
421036	11-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	10,6	Besos	cre	3	SMD	80	10/05/2017 10:00:00	5246	72	15	88	0	hora	0
421008	10-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	11,5	Besos	cre	3	SMD	82	10/05/2017 10:00:00	4597	71	12	87	0	hora	0
421039	E05B INI Rampa	R. DALT	11,5	Besos	cre	1	SMS	NA	10/05/2017 10:00:00	532	NA	7	NA	0	hora	0
421041	E5B Lateral	R. DALT	11,505	Besos	cre	2	SMS	NA	10/05/2017 10:00:00	1144	NA	3	NA	0	hora	0
421006	8-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	12,25	Besos	cre	3	SMD	86	10/05/2017 10:00:00	5571	77	17	92	0	hora	0

*Taula 3. Lectures dels aforadors del SCT (Font: Servei Català de Trànsit)*

Cada fila d'aquesta taula conté totes les dades que ha llegit un aforador en un instant de temps. Hi ha dades d'un total de 114 aforadors, dels quals 24 es troben a rampes d'accés o vies laterals i la resta es troben a la via principal de les Rondes. A continuació s'explica el contingut de cada columna:

1. “SECTION\_CODE”. Identificador de l'aforador.
2. “ali”. Àlies de l'aforador.
3. “via”. Nom de la via (Ronda de Dalt o Ronda Litoral).
4. “pk”. Punt quilomètric.
5. “sen”. Sentit en format alfanumèric (Besòs o Llobregat).
6. “senCreDec”. Sentit normalitzat (creixen o decreixent).
7. “nCar”. Nombre de Carrils.
8. “tipEquip”. Tipus d'equip (SMD o SMS).
9. “velFFSec”. Velocitat de flux lliure de la secció.

10. "dat". Data de la dada en el període d'agregació
11. "int". Nombre de vehicles que han circulat per la secció durant el període d'agregació.
12. "vel". Velocitat mitjana de la secció durant el període d'agregació.
13. "ocu". Percentatge de temps d'ocupació de la/les espira/es durant el període d'agregació.
14. "com". Aforament del percentatge de vehicles menors de 7 metres durant el període d'agregació.
15. "err". Error d'agregació.
16. "agrTem". Agregació temporal de la dada.
17. "camares". Camp de validació del registre.

Tot i explicar el significat i contingut de cada columna, calen algunes clarificacions per entendre completament les dades. Els equips SMS utilitzen espiras simples mentre que els equips SMD utilitzen espiras dobles. Això permet que els equips SMD puguin calcular velocitats i composicions mentre que els equips SMS no poden calcular aquests camps. A la taula apareix el valor "NA" en aquest cas significat valor no disponible. L'error d'agregació màxim permès és del 15%, i totes les lectures segueixen la normativa PNE 199152-1 (Oct.2015) que regula la qualitat de les dades dels anàlisis de dades de tràfic interurbà. Per al camp "camares", qualsevol valor diferent de 0 significaria que les dades no són vàlides. Per últim, tots els àlies segueixen el mateix format exceptuant "E06B Lateral", "E06LL INI Rampa", "E06LL Lateral", "E20B Rampa", "E22LL INI Rampa", "E22LL Lateral", "E23B INI Rampa", "E23B Lateral", "E24B INI Rampa", "E24B Lateral", "E24LL INI Rampa", "E24LL Lateral", "E30B INI Rampa", "E30LL INI Rampa", "E30LL Lateral", "E5B Lateral", "E5LL Lateral", "S11B INI Rampa", "S11LL INI Rampa", "S21B Rampa", "S22LL INI Rampa", "S23B INI Rampa", "S30B INI Rampa" i "S30LL INI Rampa". Aquests aforadors es troben situats directament a rampes d'accés a les rondes o a laterals de les vies i la seva nomenclatura es compon de:

- "E": entrada a la via.
- "S": sortida de la via.
- "B": sentit Besos.
- "LL": sentit Llobregat.

Un cop entès el contingut de les dades, per a la simulació del trànsit no tots aquests camps seran requerits. Les dades necessàries seran la localització exacta de la lectura, utilitzant

el nom de la via, el punt quilomètric i el sentit o el àlies en cas de ser un accés o una via lateral de les Rondes. També serà necessari el nombre de vehicles que ha passat per la secció en el període d'agregació i la velocitat mitjana que aquests portaven. Prèviament, s'han filtrat les dades no vàlides segons el valor de l'error i el camp de validació del registre. Finalment, s'han descartat les dades on l'àlies indicava que l'aforador es troba a una via lateral de les rondes, ja que la xarxa de la que es disposa al SUMO presenta únicament la via principal de les Rondes en ambdós sentits i tots els accessos.

Cal destacar que desafortunadament no existeixen aforadors en tots els accessos de les Rondes, per tant només es recullen dades d'alguns dels accessos.

D'altra banda, també es disposa de les dades proveïdes per la font anònima. Aquesta font decideix mantenir-se en l'anonimat ja que desconeix el caràcter públic de les dades que s'han compartit. No és possible representar les dades en aquest treball ja que contenen informació identificativa, però igualment poden ser utilitzades per a la simulació i els resultats d'aquesta si que poden ser representats.

Aquestes dades no estan en el mateix format que les dades del Servei Català de Trànsit, estan presentades en format d'informe. Aquest informe ha estat també elaborat amb dades provinents d'aforadors amb tecnologia d'espines magnètiques, per tant podrien proveir dels mateixos aforadors que utilitza el Servei Català de Trànsit. Tot i això, el format de l'informe és diferent, ja que apareix diferenciat cada aforador tot proporcionant gràfics i mitjanes per interpretar la informació. Casualment, totes les lectures són de maig de 2017, per tant poden ser comparades amb les dades del Servei Català de Trànsit per verificar la seva validesa i rigorositat. Entre les dades que podem trobar destaquen gràfic que mostren el percentatge d'ocupació, la velocitat i la quantitat de vehicles per hora per a cada aforador al llarg de les 24 hores del dia segons el dia de la setmana. Les dades són mitjanes de tots els dies del mes de maig del 2017. Aquests valors coincideixen amb les dades facilitades pel Servei Català de Trànsit, però el fet de que es presentin en un format més visual pot ajudar a la interpretació de l'evolució del trànsit al llarg de les Rondes i al llarg de les hores del dia. Per contra, aquestes dades no presenten llegenda alguna ni s'especifica que segueixin alguna normativa o criteri d'errors. Tampoc apareixen en aquestes dades els aforadors ubicats a les rampes d'accés ni a les vies laterals.

## 5. Simulació

Un cop la xarxa de les Rondes ha estat completament importada al SUMO i es disposa de les dades del trànsit, es pot procedir a realitzar una simulació amb aquestes dades i corroborar que el model creat presenta un comportament com el de la realitat. D'aquesta manera el model quedarà validat i es podran realitzar altres estudis amb el mateix model, coneixent que es comportarà com es comporten les Rondes de Barcelona.

### 5.1. Vehicles al SUMO

Per afegir els vehicles a la simulació, cal primer conèixer les diferents maneres de les que disposa SUMO per fer-ho i quina d'elles és més interessant en l'àmbit d'aquest treball concretament. De la mateixa manera que fitxers en format *“.xml”* s'utilitzaven per definir una xarxa, per a la definició del trànsit de la xarxa caldrà escriure un fitxer amb extensió *“.rou.xml”*.

Primerament es definiran diverses maneres d'afegir vehicles al SUMO que podran servir d'utilitat:

- Creació de vehicles i rutes
- Creació de fluxos de vehicles (DUAROUTER)
- Utilització de punts d'observació (DFROUTER)

Existeixen altres opcions per generar vehicles al SUMO, però amb aquestes tres alternatives és possible simular pràcticament qualsevol escenari. Les tres opcions apareixen ordenades de la més senzilla a la més complexa i seran explicades a continuació.

#### 5.1.1. Vehicles i rutes

L'opció més bàsica de la que SUMO disposa consisteix en definir possibles rutes per a una xarxa en concret i crear vehicles amb determinades propietats que prenguin una ruta o una altra.

Per tant, primerament és necessari definir una ruta. Les rutes, igual que els nodes, les arestes, o qualsevol element del SUMO, té unes característiques anomenades atributs, dels quals alguns s'han de definir obligatòriament i altres són opcionals. A continuació es mostra una taula amb els atributs d'una ruta.

Attribute Name	Value Type	Description
<b>id</b>	id (string)	The name of the route
<b>edges</b>	id list	The edges the vehicle shall drive along, given as their ids, separated using spaces
<b>color</b>	color	This route's color

Taula 4. Atributs d'una ruta (Font: SUMO User Documentation)

En negreta apareixen els atributs que s'han de definir obligatòriament, i en aquest cas seran els únics que s'utilitzaran. Per una banda, l'atribut "id" ens servirà per identificar la ruta quan s'hagi de definir un vehicle que l'hagi de seguir. L'atribut "edges" consisteix en una llista dels identificadors d'arestes de les que es compondrà la ruta. És necessari que totes les arestes d'aquesta llista estiguin unides i disposin d'almenys un carril en el sentit de la ruta. D'aquesta manera es poden definir tantes rutes com sigui necessari.

Un cop creades una o més rutes, es poden crear vehicles i indicar que les segueixin. Els atributs dels que disposa un vehicle apareixen a continuació.

Attribute Name	Value Type	Description
<b>id</b>	id (string)	The name of the vehicle
<b>type</b>	id	The id of the <a href="#">vehicle type</a> to use for this vehicle.
<b>route</b>	id	The id of the route the vehicle shall drive along
<b>color</b>	color	This vehicle's color
<b>depart</b>	float (s) or one of <i>triggered</i> , <i>containerTriggered</i>	The time step at which the vehicle shall enter the network; see <a href="#">#depart</a> . Alternatively the vehicle departs once a <a href="#">person enters</a> or a <a href="#">container is loaded</a>
<b>departLane</b>	int/string (≥0, "random", "free", "allowed", "best", "first")	The lane on which the vehicle shall be inserted; see <a href="#">#departLane</a> . <i>default</i> : "first"
<b>departPos</b>	float(m)/string ("random", "free", "random_free", "base", "last")	The position at which the vehicle shall enter the net; see <a href="#">#departPos</a> . <i>default</i> : "base"
<b>departSpeed</b>	float(m/s)/string (≥0, "random", "max")	The speed with which the vehicle shall enter the network; see <a href="#">#departSpeed</a> . <i>default</i> : 0
<b>arrivalLane</b>	int/string (≥0, "current")	The lane at which the vehicle shall leave the network; see <a href="#">#arrivalLane</a> . <i>default</i> : "current"
<b>arrivalPos</b>	float(m)/string (≥0(1), "random", "max")	The position at which the vehicle shall leave the network; see <a href="#">#arrivalPos</a> . <i>default</i> : "max"
<b>arrivalSpeed</b>	float(m/s)/string (≥0, "current")	The speed with which the vehicle shall leave the network; see <a href="#">#arrivalSpeed</a> . <i>default</i> : "current"
<b>line</b>	string	A string specifying the id of a public transport line which can be used when specifying <a href="#">person rides</a>
<b>personNumber</b>	int (in [0, personCapacity])	The number of occupied seats when the vehicle is inserted. <i>default</i> : 0
<b>containerNumber</b>	int (in [0, containerCapacity])	The number of occupied container places when the vehicle is inserted. <i>default</i> : 0
<b>reroute</b>	bool	Whether the vehicle should be equipped with a <a href="#">rerouting device</a> (setting this to <i>false</i> does not take precedence over other assignment options)
<b>via</b>	id list	List of intermediate edges that shall be passed on <a href="#">rerouting</a> .  <b>Note:</b> when <i>via</i> is not set, any <a href="#">&lt;stop&gt;</a> -elements that belong to this route will automatically be used as intermediate edges. Otherwise <i>via</i> takes precedence.
<b>departPosLat</b>	float(m)/string ("random", "free", "random_free", "left", "right", "center")	The lateral position on the departure lane at which the vehicle shall enter the net; see <a href="#">Simulation/SublaneModel</a> . <i>default</i> : "center"
<b>arrivalPosLat</b>	float(m)/string ("left", "right", "center")	The lateral position on the arrival lane at which the vehicle shall arrive; see <a href="#">Simulation/SublaneModel</a> . by default the vehicle does not care about lateral arrival position

Taula 5. Atributs d'un vehicle (Font: SUMO User Documentation)

De tots aquests atributs, només alguns tenen realment utilitat en aquest treball i apareixen explicats a continuació. L'atribut "id" és obligatori i permet identificar el vehicle en el cas que es vulgui mesurar algun paràmetre del vehicle posteriorment o localitzar-lo si hi ha algun error



en la simulació. L'atribut "type" del vehicle permet definir el tipus de vehicle dins de les classes que s'hagin creat. Aquest atribut serà tractat amb més detall en el següent paràgraf. L'atribut "route" també és obligatori i indica l'identificador de la ruta que seguirà el vehicle. L'atribut "depart" és també obligatori i indica l'instant de temps un cop començada la simulació en el que el vehicle serà introduït. Aquests atributs són suficients per definir un vehicle correctament. Tot i això, es poden utilitzar altres atributs per tal de donar més realisme a la simulació. Per exemple l'atribut "departLane" podria ser configurat en mode aleatori en el cas que els vehicles siguin generats en una aresta amb més d'un carril (com per exemple l'inici de la via principal de les Rondes). Del contrari, tots els vehicles seran generats al carril de la dreta. També seria interessant definir els atributs "departSpeed" i "arrivalSpeed" ja que per defecte els vehicles són creats amb velocitat nul·la i abandonen la xarxa amb la velocitat actual. En el cas de les Rondes, els vehicles que són creats a l'inici de cada aresta entesa com a entrada a les Rondes podrien aparèixer amb una velocitat aleatòria o definir-la en el cas que es disposes de dades detallades. Igualment, els vehicles que abandonen la xarxa pel final d'una aresta entesa com a sortida de les Rondes podrien reduir la velocitat pensant en que pot haver-hi una rotonda, un semàfor, trànsit o un senyal per cedir el pas.

A l'hora de definir molts vehicles, existeix l'opció de definir classes de vehicles. D'aquesta manera, es poden crear vehicles que compleixin determinades condicions i diferenciar, per exemple, entre motocicletes i vehicles, o inclús entre diferents models de vehicles amb diferents consum, emissió i acceleració. Per crear una classe de vehicles, existeixen els següents atributs.

Attribute Name	Value Type	Default	Description
id	id (string)	-	The name of the vehicle type
accel	float	2.6	The acceleration ability of vehicles of this type (in m/s <sup>2</sup> )
decel	float	4.5	The deceleration ability of vehicles of this type (in m/s <sup>2</sup> )
apparentDecel	float	==decel	The apparent deceleration of the vehicle as used by the standard model (in m/s <sup>2</sup> ). The follower uses this value as expected maximal deceleration of the leader.
emergencyDecel	float	==decel	The maximal physically possible deceleration for the vehicle (in m/s <sup>2</sup> ).
sigma	float	0.5	Car-following model parameter, see below
tau	float	1.0	Car-following model parameter, see below
length	float	5.0	The vehicle's <b>netto</b> -length (length) (in m)
minGap	float	2.5	Empty space after leader [m]
maxSpeed	float	55.55 (200 km/h) for vehicles, 1.39 (5 km/h) for pedestrians	The vehicle's maximum velocity (in m/s)
speedFactor	float	1.0	The vehicles expected multiplier for lane speed limits
speedDev	float	0.0	The deviation of the speedFactor; see below for details
color	RGB-color	"1,1,0" (yellow)	This vehicle type's color
vClass	class (enum)	"passenger"	An abstract vehicle class (see below). By default vehicles represent regular passenger cars.
emissionClass	emission class (enum)	"PC_G_EU4"	An emission class (see below). By default a gasoline passenger car conforming to emission standard <i>EURO 4</i> is used.
guiShape	shape (enum)	"unknown"	a vehicle shape for drawing. By default a standard passenger car body is drawn.
width	float	1.8	The vehicle's width [m] (used only for visualization with the default model, affects sublane model)
imgFile	filename (string)	""	Image file for rendering vehicles of this type (should be grayscale to allow functional coloring)
laneChangeModel	lane changing model name (string)	"LC2013"	The model used for changing lanes
carFollowModel	car following model name (string)	"Krauss"	The model used for car following
personCapacity	int	4	The number of persons (excluding an autonomous driver) the vehicle can transport.
containerCapacity	int	0	The number of containers the vehicle can transport.
boardingDuration	float	0.5	The time required by a person to board the vehicle.
loadingDuration	float	90.0	The time required to load a container onto the vehicle.
latAlignment	string	center	The preferred lateral alignment when using the sublane-model. One of (left, right, center, compact, nice, arbitrary).
minGapLat	float	0.6	The desired minimum lateral gap when using the sublane-model
maxSpeedLat	float	1.0	The maximum lateral speed when using the sublane-model
actionStepLength	float	global default (defaults to the simulation step, configurable via <code>--default.action-step-length</code> )	The interval length for which vehicle performs its decision logic (acceleration and lane-changing). The given value is processed to the closest (if possible smaller) positive multiple of the simulation step length.

Taula 6. Atributs d'una classe de vehicles (Font: SUMO User Documentation)

Com es pot comprovar, existeixen una infinitat d'atributs per editar. Tots els vehicles en els que no s'especifica la classe, pertanyen a la classe "DEFAULT\_VEHTYPE". Aquesta classe també pot ser redefinida igual que altres classes poden ser creades. Per al trànsit de les Rondes, seria interessant identificar tots els vehicles i agrupar-los en classes per tal de realitzar una simulació més realista.

Un cop entesos aquests tres conceptes, es pot redactar el fitxer amb extensió ".rou.xml" que conté la informació. A continuació podem veure un exemple.

```

<routes>
  <type id="type1" accel="0.8" decel="4.5" sigma="0.5" length="5" maxSpeed="70"/>

  <route id="route0" color="1,1,0" edges="beg middle end rend"/>

  <vehicle id="0" type="type1" route="route0" depart="0" color="1,0,0"/>
  <vehicle id="1" type="type1" route="route0" depart="0" color="0,1,0"/>
</routes>

```

Il·lustració 17. Exemple de fitxer amb rutes i vehicles (Font: SUMO User Documentation)

Les avantatges de simular el trànsit mitjançant rutes i vehicles es que tots els paràmetres queden completament definits i són coneguts per l'usuari, ja que els ha d'introduir.

El principal inconvenient és que per a escenaris grans i simulacions a grans escala (com és el cas de les Rondes) no és eficient definir tots els vehicles un per un. Igualment, existeixen una infinitat d'arestes connectant entrades amb sortides amb identificadors desconeguts a priori. Per tant, crear totes les rutes possibles connectant cada entrada amb totes les possibles sortides tampoc seria eficient, ja que existeixen altres opcions.

### 5.1.2. Fluxos de vehicles

Una opció més interessant per al cas de les Rondes és definir fluxos de vehicles. Un flux consisteix en un número determinat de vehicles que comparteixen aresta d'inici i de final del viatge.

En els fluxos de vehicles només és necessari determinar l'aresta d'inici i final del trajecte, no s'ha de determinar tot el conjunt d'arestes que el vehicle seguirà com a les rutes. El SUMO computa el camí més curt en distància entre les dues arestes introduïdes a base d'iteracions mitjançant un programa incorporat anomenat DUAROUTER. D'aquesta manera, és més senzill per a l'usuari definir un trajecte. Igualment, el sumo funciona amb rutes. És a dir, DUAROUTER calcularà les respectives rutes i les utilitzarà per a la simulació, però l'usuari no veurà en cap moment aquestes rutes.

A continuació es mostren els atributs que existeixen per definir un flux de vehicles.

Attribute Name	Value Type	Description
<b>id</b>	id (string)	The name of vehicles that will be generated using this trip definition; vehicles and routes will be named "<id>_<RUNNING>" where <RUNNING> is a number starting at 0 and increased for each vehicle.
<b>from</b>	edge id	The name of the edge the routes start at; the edge must be a part of the used network
<b>to<sup>(1)</sup></b>	edge id	The name of an edge the routes end at; the edge must be a part of the used network
<b>via</b>	edge ids	List of intermediate edge ids which shall be part of the route; the edges must be a part of the used network
<b>type</b>	type id	The type id of the vehicles to generate
<b>begin</b>	int	The begin time for the described interval
<b>end</b>	int	The end time for the interval; must be greater than <begin>; vehicles will be inserted between <begin> and <end>-1
<b>number</b>	int	The number of vehicles that shall be inserted during this interval
<b>color</b>	color	Defines the color of the vehicles and their routes
<b>departLane</b>	int/string (≥0,"random","free","departlane")	The lane on which the vehicle shall be inserted
<b>departPos</b>	float(m)/string ("random","free","random_free","base")	The position at which the vehicle shall enter the net; "free" means the point closest to the start of the departlane where it is possible to insert the vehicle. "random_free" tries forcefully to find a free random position and if that fails, places the vehicle at the next "free" position. "base" sets the vehicle's depart position to the vehicle's length + eps (eps=.1m), this means the vehicle is completely at the begin of the depart lane.
<b>departSpeed</b>	float(m/s)/string (≥0,"random","max")	The speed with which the vehicle shall enter the network.
<b>arrivalLane</b>	int/string (≥0,"current")	The lane at which the vehicle shall leave the network  <b>Note:</b> see Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes#Vehicles and Routes
<b>arrivalPos</b>	float(m)/string (≥0 <sup>(1)</sup> ,"random","max")	The position at which the vehicle shall leave the network  <b>Note:</b> see Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes#Vehicles and Routes
<b>arrivalSpeed</b>	float(m/s)/string (≥0,"current")	The speed with which the vehicle shall leave the network  <b>Note:</b> see Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes#Vehicles and Routes

Taula 7. Atributs d'un flux de vehicles (Font: SUMO User Documentation)

Es pot apreciar com molts dels atributs coincideixen amb els d'un vehicle i tenen el mateix funcionament, a diferència de la manera d'introduir la ruta. L'atribut "id" servirà per identificar cada vehicle que sigui creat per el flux, però per diferenciar-los entre ells és numeraran segons vagin apareixent. El seu identificador serà l'identificador del flux amb el número del vehicle afegit al darrere després d'un punt. En aquest cas, la manera de determinar el nombre de vehicles que seran creats es introduint el nombre total de vehicles a introduir en l'atribut "number" i especificar l'inici i el final de l'interval en el que seran creats amb els atributs "begin" i "end" respectivament.

També existeixen altres opcions per definir la quantitat de vehicles a introduir per un flux i aquests apareixen llistats a continuació.

Attribute Name	Value Type	Description
begin	float(s)	first vehicle departure time
end	float(s)	end of departure interval (if undefined, defaults to 24 hours)
vehsPerHour	float(#/h)	number of vehicles per hour, equally spaced (not together with period or probability)
period	float(s)	insert equally spaced vehicles at that period (not together with vehsPerHour or probability)
probability	float([0,1])	probability for emitting a vehicle each second (not together with vehsPerHour or period), see also <a href="#">Simulation/Randomness</a>
number	int(#)	total number of vehicles, equally spaced

Taula 8. Atributs extres d'un flux de vehicles (Font: SUMO User Documentation)

Aquests atributs són complementaris, és a dir, no és possible configurar-los tots, s'ha d'escollir el que millor s'ajusti al model desitjat. Igualment, tots ells són igual d'útils i dependrà de la simulació l'ús d'un atribut o d'un altre.

A continuació es pot veure un exemple del fitxer amb extensió ".rou.xml" amb un flux de vehicles implementat.

```
<flows>
  <flow id="0" from="edge0" to="edge1" begin="0" end="3600" number="100"/>
</flows>
```

Il·lustració 18. Exemple de fitxer amb fluxos de vehicles (Font: SUMO User Documentation)

La principal avantatge d'aquesta opció és que l'ús implícit de DUAROUTER facilita la feina de l'usuari. En el cas de les Rondes de Barcelona, només existeix una possible ruta entre una entrada i una sortida, per tant DUAROUTER necessita de molt poques iteracions per a trobar aquest camí i ho farà de manera ràpida. D'aquesta manera, no cal conèixer els identificadors de totes les arestes que formen les vies principals de les Rondes, i únicament cal centrar-se en les arestes d'origen i de final, que estan documentades com a entrades i sortides.

L'únic inconvenient és que igualment cal definir un flux per totes les combinacions d'accessos de les Rondes i això pot ser poc eficient. En qualsevol cas, és més eficient que definir totes

les rutes i els vehicles individualment.

### 5.1.3. Punts d'observació

Finalment, l'opció més comú tractant-se de realitzar simulacions realistes. Aquesta opció està pensada per utilitzar informació real del trànsit recollida en punts concrets d'una xarxa. A partir d'una xarxa del SUMO, un fitxer amb les ubicacions de detectors de trànsit a la xarxa i un fitxer amb les lectures d'aquests detectors, SUMO computa mitjançant el programa DFROUTER les rutes i els vehicles per satisfer aquestes condicions.

Inicialment, cal escriure un arxiu en format “.xml” amb les ubicacions dels detectors. Aquest fitxer hauria de semblar el de la següent imatge.

```
<detectors>
  <detectorDefinition id="<DETECTOR_ID>" lane="<LANE_ID>" pos="<POS>" />
  ... further detectors ...
</detectors>
```

*Il·lustració 19. Exemple de fitxer amb ubicacions de detectors (Font: SUMO User Documentation)*

Únicament cal especificar per cada detector un identificador, l'identificador del carril on es troba (normalment sol ser el mateix identificador que el de l'aresta afegint un coixinet al final i un número indicant el carril començant per 0 pel carril de més a la dreta) i la posició en metres dins del carril (on 0 és l'inici del carril).

Seguidament, cal redactar un arxiu en format “.csv” (amb les dades separades per punts i coma) on introduir les lectures de cada detector. Aquest arxiu ha de tenir una estructura similar a la següent.

```
Detector;Time;qPKW;qLKW;vPKW;vLKW
myDet1;0;10;2;100;80
... further entries ...
```

*Il·lustració 20. Exemple de fitxer amb lectures de detectors (Font: SUMO User Documentation)*

La primera fila cal que sigui exactament igual a la de la imatge, amb els títols de les columnes separats utilitzant punts i coma. Les següents files corresponen a les dades de cada detector. Ordenades d'esquerra a dreta, les 4 primeres columnes són obligatòries. A la primera s'ha d'introduir l'identificador del detector i aquest ha de coincidir amb l'identificador especificat a l'arxiu anterior. A la segona cal introduir el període de temps en minuts que aquest detector descriu. A la tercera el nombre de vehicles que han travessat el detector en el període de temps especificat. I a la quarta la velocitat mitjana en quilòmetres per hora dels vehicles que han passat.

Per tal d'obtenir els fitxers amb les rutes i els vehicles computats, cal executar la següent ordre per la terminal:

```
dfrouter --net-file net.net.xml --detector-files detector.xml --measure-files measure.csv --routes-output routes.rou.xml --emitters-output vehicles.xml
```

L'arxiu anomenat "*net.net.xml*" correspon a la xarxa en el format que llegeix el SUMO, l'arxiu "*detector.xml*" conté les ubicacions dels detectors i l'arxiu "*measure.csv*" conté les dades dels detectors. Executant aquesta ordre es generaran dos arxius amb els resultats: l'arxiu "*routes.rou.xml*" amb les rutes computades i l'arxiu "*vehicles.xml*" amb els vehicles generats. Per a dur a terme una posterior simulació, caldrà ajuntar les dades del fitxer amb les rutes i el fitxer amb els vehicles en un únic fitxer amb format "*.rou.xml*". Cal remarcar que és possible canviar el nom de qualsevol dels fitxers. Els noms s'han triat per tal de presentar un exemple més clar.

Les avantatges d'aquesta opció són clares, ja que donada una xarxa urbana real on les dades del trànsit han sigut mesurades mitjançant detectors, aquesta opció reproduceix pràcticament la mateixa situació. L'únic treball a fer és introduir les dades en el format corresponent i SUMO amb el programa DFROUTER computa les rutes i els vehicles.

El principal inconvenient és que aquesta opció és molt estricta en quant als requeriments. Per començar, és obligatori que hi hagi detectors a qualsevol accés de la xarxa del SUMO, ja siguin entrades o sortides. Un altre condició és que tots els detectors necessiten proveir dades obligatòriament respecte la quantitat de vehicles que passen i la velocitat mitjana que aquests porten.

Per a la simulació d'aquest projecte, aquesta seria l'opció ideal. Tot i això, les condicions anteriors impedeixen utilitzar aquest mètode. Les dades de les que es disposen només contenen lectures d'alguns accessos de les Rondes, no tots. A part, els detectors que es troben a les rampes d'accés de les Rondes són sistemes d'espira simple (SMS) i no llegeixen velocitats.

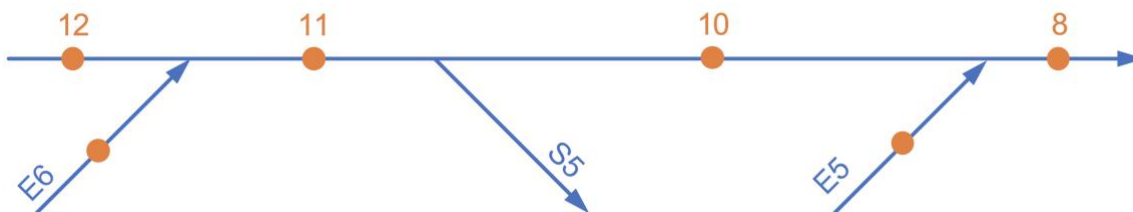
## 5.2. Trànsit de les Rondes al SUMO

Un cop estudiades les tres possibles opcions per introduir el trànsit al SUMO i comparades les seves avantatges i inconvenients, s'ha decidit utilitzar l'opció de crear fluxos de vehicles.

Donada la magnitud de la xarxa i la immensa quantitat de dades a introduir, s'ha decidit únicament simular un tram de les Rondes. També s'ha aprofitat per simular un tram del qual es tinguin dades no només dels aforadors situats a la via principal sinó també a les entrades i sortides. Aquest tram correspon a la Ronda de Dalt en direcció Besòs, des de l'entrada



número 6 fins l'entrada número 5 incloent la sortida número 5 situada entre les dos entrades i també un petit tram abans i després de les dues entrades. A continuació es mostra un esquema del tram de les Rondes que es simularà.



*Il·lustració 21. Esquema de l'escenari de la simulació (Font pròpia)*

En color taronja s'ha senyalat la ubicació dels aforadors i el número. L'esquema no està realitzat a escala, per tant les distàncies entre els aforadors i els accessos no són representatives. Sí ho és la posició d'aquests.

A la taula següent es mostren les dades dels aforadors involucrats en la simulació.

SECTION_CODE	ali	via	pk	sen	dat	int	vel
421010	12-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	9,5	Besos	10/05/2017 10:00	3027	78
421049	E06B INI Rampa	R. DALT	9,7	Besos	10/05/2017 10:00	1820	NA
421036	11-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	10,6	Besos	10/05/2017 10:00	5246	72
421008	10-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	11,5	Besos	10/05/2017 10:00	4597	71
421039	E05B INI Rampa	R. DALT	11,5	Besos	10/05/2017 10:00	532	NA
421006	8-SMD-2 R.Dalt	R. DALT	12,25	Besos	10/05/2017 10:00	5571	77

*Taula 9. Dades dels aforadors (Font: Servei Català de Trànsit)*

Aquestes dades han sigut únicament extretes de les dades proporcionades pel Servei Català de Trànsit. Tot i això, s'ha triat aquesta hora del dia en concret ja que a partir de les 10:00 el tràfic es mantenia pràcticament constant durant dues hores en aquest tram segons l'estudi d'origen anònim.

Per dur a terme la simulació, s'han realitzat dues suposicions:

- Primerament s'ha assumit que el trànsit és constant durant el període de simulació. Quan els aforadors han començat a llegir informació a partir de les 10:00 del matí fins les 10:59, la via principal de les Rondes ja estava plena de vehicles, i aquests han començat a passar pels aforadors un instant després del temps d'inici. En la simulació al SUMO, els vehicles seran introduïts a la xarxa únicament pels accessos. Per tant existeix un període de temps en el que la via principal de les Rondes estarà buida i

s'anirà emplenant de vehicles amb el pas del temps. Per aquest motiu no es començaran a recollir dades de la simulació fins que les lectures siguin estables. Tot i això, no es pot confirmar que les condicions del trànsit en aquest període de temps donin lloc a un sistema estable en la realitat, però és la millor aproximació que es pot fer.

- La segona suposició que s'ha fet ha sigut definir el flux de vehicles que marxa de la simulació per la sortida número 5 mitjançant el principi de continuïtat. D'aquesta manera, es pot assumir que els vehicles que entren a la simulació per l'entrada 6 més els que entren per la via principal de les Rondes (aforador 12), han de passar per l'aforador 11. I conseqüentment, els vehicles que han passat per l'aforador 11 menys els vehicles que han passat per l'aforador 10 corresponen als vehicles que han marxat per la sortida 5. Així és com s'ha calculat el flux de vehicles de la sortida 5, obtenint un valor de 649 vehicles per hora. Realment, se sap que aquest principi no és compleix amb tanta exactitud, ja que existeix un període de temps entre que el vehicle passa pel primer aforador fins que arriba al següent. Això significa que la diferència de vehicles no correspon només als vehicles que han sortit, sinó que part d'aquests vehicles es troben encara entre els dos aforadors (no han tingut temps ni de sortir ni d'arribar al següent aforador). Donat que l'estat del trànsit va canviant en cada instant, és complicat calcular aquest error, i s'ha decidit assumir-lo en la simulació. D'aquests 649 vehicles per hora s'ha suposat també que 149 vehicles provenen de l'entrada número 5 i la resta de vehicles provenen d'entrades anteriors, per tant són considerats a l'aforador 12.

Enteses les condicions de la simulació, s'ha procedit a redactar el fitxer amb extensió ".rou.xml" que conté els fluxos en el següent ordre: amb origen a l'aforador 12 un flux fins a la sortida número 5 i un altre fins a l'aforador 8; amb origen a l'entrada número 6 un flux fins a la sortida número 5 i un altre fins a l'aforador 8; i amb origen a l'entrada número 5 un flux fins a l'aforador 8. Els identificadors dels accessos de les Rondes es poden trobar a la taula de l'annex citada anteriorment, i l'identificador de les dues arestes (inici i final) de la via principal de les Rondes es poden obtenir amb l'eina d'inspecció del NETEDIT. A continuació es troben les dades del fitxer mencionat.

```

<routes>

  <flow id="A" begin="0" vehsPerHour="500" departLane="random" departSpeed="max" from="74399658#0" to="48465221"/>
  <flow id="B" begin="0" vehsPerHour="2527" departLane="random" departSpeed="max" from="74399658#0" to="114321834#1"/>
  <flow id="C" begin="0" vehsPerHour="149" departSpeed="random" from="35164911" to="48465221"/>
  <flow id="D" begin="0" vehsPerHour="1671" departSpeed="random" from="35164911" to="114321834#1"/>
  <flow id="E" begin="0" vehsPerHour="532" departSpeed="random" from="237144801" to="114321834#1"/>

</routes>

```

Il·lustració 22. Fitxer amb fluxos per a la simulació (Font pròpia)

Es pot comprovar com s'han utilitzat alguns dels atributs explicats prèviament per tal d'intentar reproduir el comportament dels vehicles a les Rondes amb el major realisme possible.

Un cop creat el fitxer “.rou.xml” es pot procedir a realitzar la simulació. Per dur a terme la simulació cal especificar en un fitxer en format “.xml” amb l'extensió “.sumo.cfg” el nom dels arxius que s'utilitzaran i quina informació podem trobar a cada arxiu. Aquest arxiu resumeix la configuració de la simulació. A continuació es troba una imatge que ensenya l'estil d'aquest fitxer.

```

<configuration>

  <input>

    <net-file value="MySUMONet.net.xml"/>
    <route-files value="MyVehicles.rou.xml"/>
    <additional-files value="additional.add.xml"/>

  </input>

  <output>

    <fcd-output value="fd0idm.xml"/>

  </output>

</configuration>

```

Il·lustració 23. Arxiu amb la configuració de la simulació (Font pròpia)

Com a inputs es senyalaran la xarxa, i el fitxer amb la definició dels fluxos. També s'ha seleccionat un fitxer addicional la funció del qual s'explicarà en el següent apartat. Com a outputs és possible seleccionar molts tipus diferents de fitxers. En aquest cas s'ha seleccionat el tipus de fitxer que conté més informació. A continuació es pot veure una imatge amb el format d'aquest fitxer.

```

<fcd-export>

  <timestep time="<TIME_STEP>">
    <vehicle id="<VEHICLE_ID>" x="<VEHICLE_POS_X>" y="<VEHICLE_POS_Y>" angle="<VEHICLE_ANGLE>" type="<VEHICLE_TYPE>"
      speed="<VEHICLE_SPEED>" />
    ... more vehicles ...
  </timestep>
  ... next timestep ...

</fcd-export>

```

Il·lustració 24. Exemple del fitxer output de la simulació (Font: SUMO User Documentation)

Per a cada interval de temps de la simulació, ens apareix informació de cada vehicle que es troba a la xarxa. El significat de les variables d'aquest arxiu es troba resumit a la següent taula.

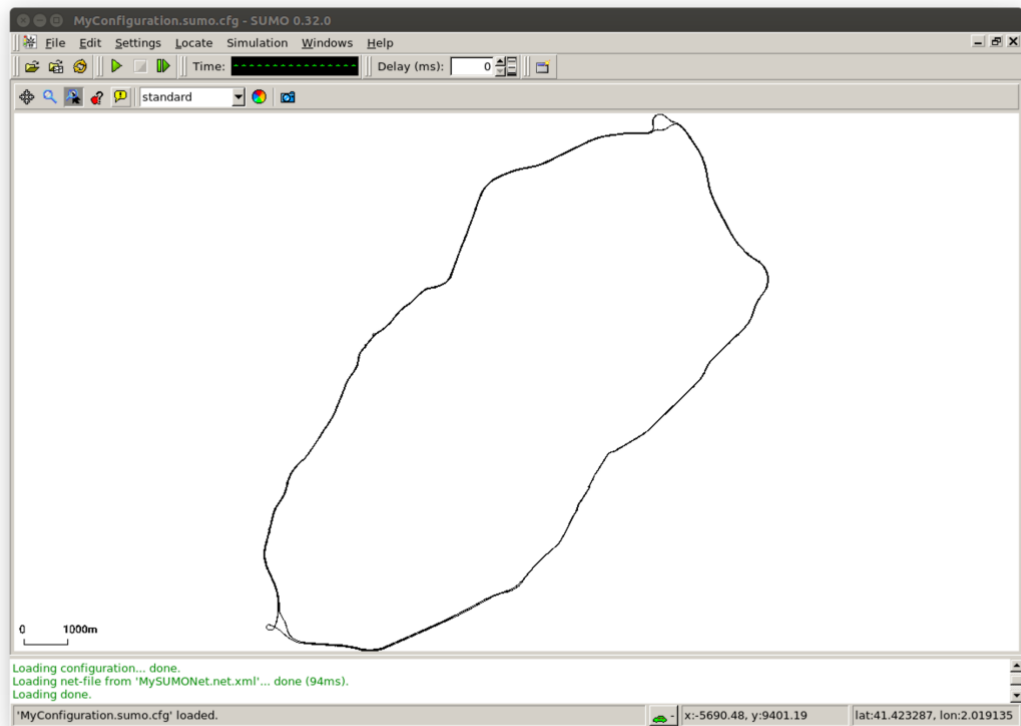
Name	Type	Description
timestep	(simulation) seconds	The time step described by the values within this timestep-element
id	id	The id of the vehicle
type	id	The name of the vehicle type
speed	m/s	The speed of the vehicle
angle	degree	The angle of the vehicle in navigational standard (0-360 degrees, going clockwise with 0 at the 12'o clock position)
x	m or longitude	The absolute X coordinate of the vehicle (center of front bumper). The value depends on the given geographic projection
y	m or latitude	The absolute Y coordinate of the vehicle (center of front bumper). The value depends on the given geographic projection
z	m	The z value of the vehicle (center of front bumper). <b>Note:</b> This value is only present if the network contains elevation data
pos	m	The running position of the vehicle measured from the start of the current lane.
lane	id	The id of the current lane.
slope	degree	The slope of the vehicle in degrees (equals the slope of the road at the current position)
signals	bitset	The <a href="#">signal state information</a> (blinkers, etc). Only present when option <code>--fcd-output.signals</code> is set.

Taula 10. Variables del fitxer output de la simulació (Font: SUMO User Documentation)

Per realitzar la simulació existeixen dues possibilitats, segons si es vol visualitzar la simulació a través de la interfície gràfica d'usuari o no. Ambdues simulacions retornaran el mateix fitxer, l'única diferència és poder visualitzar o no la simulació. En el cas d'optar per visualitzar la simulació, s'ha d'executar la següent comanda a la terminal.

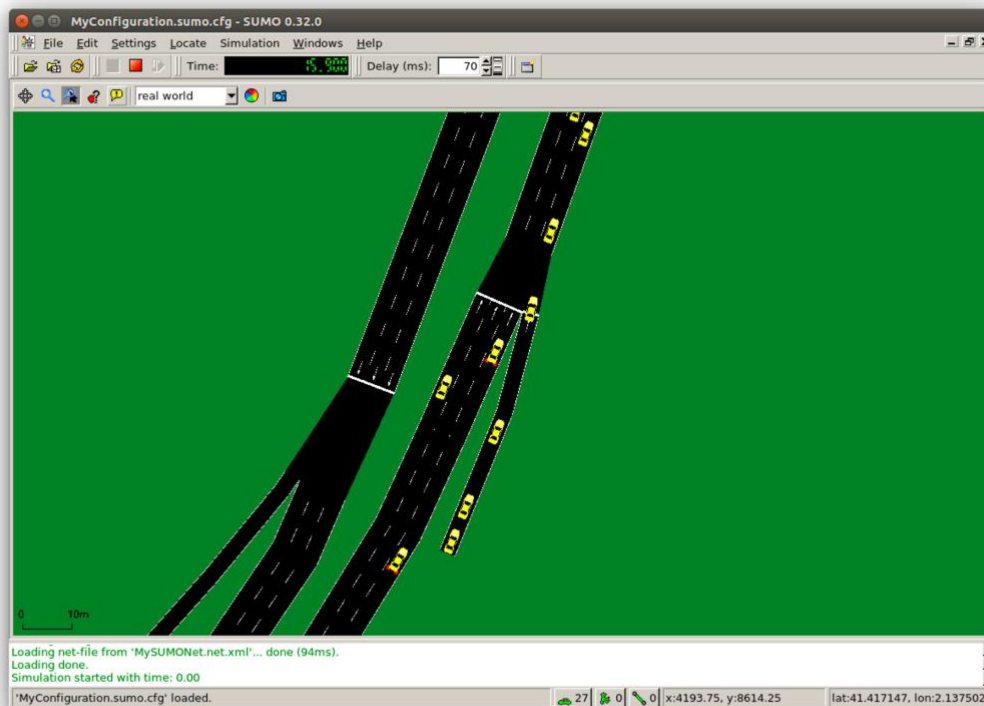
```
sumo-gui -e 7200 --step-length 0.1 -c MyConfiguration.sumo.cfg
```

El terme “-gui” indica que es visualitzarà la interfície gràfica d'usuari. Eliminant aquests 4 caràcters la simulació es realitzarà igual però no es visualitzarà. El número 7200 indica la durada de la simulació en segons, en aquest cas dues hores. El número 0,1 indica el temps entre iteracions que realitza el SUMO. Finalment cal introduir el nom del fitxer amb la configuració i la ubicació del fitxer en el cas de que no és trobi al mateix directori en el que l'usuari es troba. A l'executar la comanda, s'obre la següent finestra.



*Il·lustració 25. Finestra de visualització del SUMO-gui (Font pròpia)*

Per començar a visualitzar la simulació, cal prémer el triangle verd de la segona fila d'icones. Al següent separador, després del triangle verd, es troba un indicador de l'instant de temps en el que es troba la simulació. Més a la dreta es troba un camp configurable durant la simulació que permet regular la velocitat en que es reproduïxen les iteracions que el SUMO ha realitzat. Un cop premut el triangle verd la simulació s'inicia i podem començar a veure els primers vehicles entrant a la xarxa. A la següent imatge podem veure un instant de la simulació. S'ha seleccionat un tema més realista amb raons purament estètiques.



*Il·lustració 26. Instant de la simulació al SUMO (Font pròpia)*

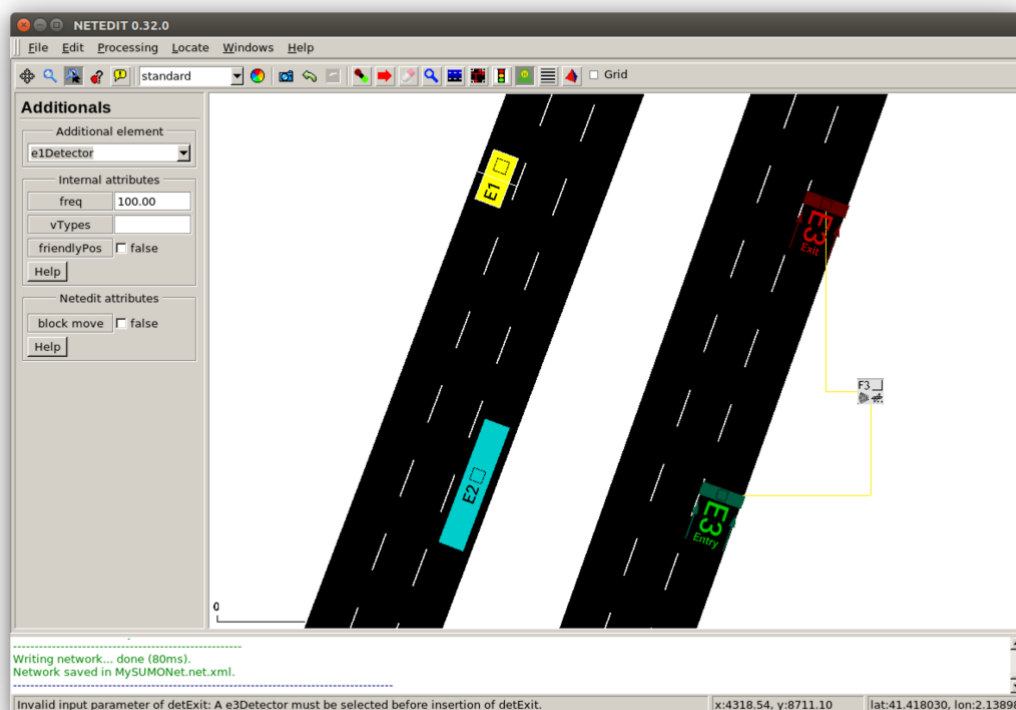
En cas de visualitzar la simulació, és necessari arribar fins al final del temps de la simulació ja que el fitxer amb els resultats es va escrivint a la vegada que el temps passa en la simulació.

### 5.3. Aparells de mesura

Amb l'objectiu de verificar que el model de les Rondes realitzat al SUMO reproduïx la realitat, cal llegir les dades de la simulació de la mateixa manera que els aforadors ho han fet amb els vehicles que circulen per les Rondes. Això es podria fer amb el fitxer output generat amb la simulació, però aquest conté la informació en un format massa detallat i caldria analitzar-lo i realitzar càlculs.

Al SUMO, existeixen diversos aparells de mesura anomenats detectors, que actuen de manera similar als aforadors que podem trobar a les Rondes. A continuació es mostra una imatge on apareixen els tres tipus diferents de detectors.





*Il·lustració 27. Tipus de detectors al SUMO (Font pròpia)*

Per configurar els detectors, cal disposar d'una xarxa en el format que SUMO interpreta. La manera més senzilla de configurar els detectors és a través de NETEDIT. Selecciónant el mode per afegir elements addicionals de la barra superior, apareixerà una columna a l'esquerra de la pantalla amb un menú desplegable on es podran seleccionar diferents elements addicionals per afegir-los a la xarxa. En aquest cas, ens centrarem en els detectors.

Primerament, el detector E1 és també anomenat al SUMO com a detector d'espires d'inducció. Per afegir-lo a la xarxa només cal clicar amb el botó esquerre a sobre d'un carril lliure. És important especificar la freqüència en segons, ja que el detector anirà recopilant dades i posteriorment les mostrarà en forma de mitjanes o totals per a intervals de temps iguals a la freqüència. També és possible visualitzar i canviar el nom del detector amb el mode d'inspecció. Aquest detector equival als detectors utilitzats pel Servei Català de Trànsit en l'obtenció de dades de les Rondes, per tant serà el que s'utilitzarà en la simulació.

Alternativament, el detector E2 té exactament el mateix funcionament que el detector E1 però presenta una longitud variable. D'aquesta manera pot extreure dades relatives al temps que els vehicles triguen en passar el sensor sencer. El detector E3 té un funcionament completament diferent. Consta de dos sensors que estan connectats entre sí. Aquests

sensors estan pensats per ubicar-los a diferents arestes en diferents punts de la xarxa, i permeten estudiar les rutes dels vehicles així com mesurar intervals de temps i velocitats.

Amb la idea de comparar les dades llegides pels detectors amb les dades dels aforadors, es situaran detectors exactament en els mateixos punts quilomètrics on es troben els aforadors. En el cas de disposar de tres carrils, s'han col·locat tres detectors E1 en paral·lel i posteriorment s'ha procedit a realitzar la mitjana de les dades obtingudes pels tres detectors o la suma total segons convingui.

Un cop situats els detectors, en guardar la xarxa oberta amb NETEDIT es guardarà un fitxer automàticament anomenat “*additional.add.xml*” amb la informació necessària per a la simulació. Aquest fitxer s'ha d'especificar a la configuració de la simulació com s'ha mostrat anteriorment.

Un cop realitzada la simulació, a part dels outputs especificats, es generarà un fitxer de text per cada detector de la xarxa anomenat de la mateixa manera que el detector. El fitxer contindrà les lectures en el següent format.

```
<interval begin=""<BEGIN_TIME>"" end=""<END_TIME>"" id=""<DETECTOR_ID>"" \
  nVehContrib=""<MEASURED_VEHICLES>"" flow=""<FLOW>"" occupancy=""<OCCUPANCY>"" \
  speed=""<MEAN_SPEED>"" length=""<MEAN_LENGTH>"" nVehEntered=""<ENTERED_VEHICLES>""/>
... further intervals ...
```

Il·lustració 28. Exemple de fitxer generat pel detector E1 (Font: SUMO User Documentation)

Per cada interval de temps especificat en el camp anomenat freqüència, apareixerà una línia al fitxer de text amb la següent informació.

Name	Type	Description
begin	(simulation) seconds	The first time step the values were collected in
end	(simulation) seconds	The last time step + DELTA_T the values were collected in
id	id	The id of the detector
nVehContrib	#vehicles	The number of vehicles that have completely passed the detector within the interval
flow	#vehicles/hour	The number of contributing vehicles extrapolated to an hour
occupancy	%	The percentage (0-100%) of the time a vehicle was at the detector.
speed	m/s	The mean velocity of all completely collected vehicles (-1 indicates that no vehicles were collected).
length	m	The mean length of all completely collected vehicles (-1 indicates that no vehicles were collected).
nVehEntered	#vehicles	All vehicles that have touched the detector. Includes vehicles which have not passed the detector completely (and which do not contribute to collected values).

Taula 11. Variables del fitxer generat pel detector E1 (Font: SUMO User Documentation)

Destacar que el número de vehicles que han passat pel detector i la velocitat mitjana d'aquests són exactament els mateixos valors que mesuren els aforadors, per tant és possible realitzar una comparació.

## 5.4. Resultats de la simulació

S'ha realitzat la simulació amb les condicions especificades ens els apartats previs. Tot i haver-se generat el fitxer output especificat amb tota la informació sobre la simulació, no ha calgut consultar-lo ja que els fitxers generats per cada detector contenen la informació necessària.

S'ha realitzat una simulació de dues hores i s'han agafat valors dels detectors a partir d'una hora de simulació, ja que els valors llegits es mantenen estables. A la següent taula es comparen els valors dels aforadors amb els dels detectors.

identificador	aforador		detector		error (%)	
	total vehicles	velocitat mitjana	total vehicles	velocitat mitjana	total vehicles	velocitat mitjana
12	3027	78	3012	80	0,50	2,56
E6	1820	NA	1217	23	33,13	NA
11	5246	72	4256	79	18,87	9,72
S5	NA	NA	505	50	NA	NA
10	4597	71	3748	78	18,47	9,86
E5	532	NA	357	16	32,89	NA
8	5571	77	4102	79	26,37	2,60

Taula 12. Resultats de la simulació (Font pròpia)

Com a resultat de la simulació trobem uns errors de fins el 33% en les lectures dels detectors. Aquests errors mostren la diferència entre el valor que ha llegit l'aforador en la via real de les Rondes i el valor que ha llegit el detector en la simulació. Obtenir un error del 0% significaria doncs que el detector ha mesurat el mateix valor que l'aforador, comportant-se d'aquesta manera el model igual que la realitat.

A continuació s'analitzaran les lectures una per una amb l'objectiu de justificar els errors obtinguts.

- El detector 12 presenta lectures molt acurades. Al ser el primer detector de la xarxa, els vehicles eren generats pràcticament al costat del detector i difícilment no s'hagués satisfet el total de vehicles de l'aforador. També es pot veure que la velocitat mitjana és exactament 80 quilòmetres per hora ja que era la velocitat a la que es generaven els vehicles, i en absència de retencions, els vehicles han mantingut aquesta velocitat constant.
- El detector E6 presenta grans discrepàncies en quan al nombre total de vehicles. A l'inici de la simulació, aquest error ha sigut nul. Però ha mesura que ha avançat la simulació, s'han donat situacions com la mostrada en la següent imatge.



*Il·lustració 29. Instant de temps de la simulació (Font pròpia)*

Quan s'han generat diversos vehicles consecutius aleatòriament pel carril dret del detector 12, aquests han provocat que els vehicles de la entrada E6 no poguessin incorporar-se a la via. Aquest fet ha fet frenar el flux de generació de vehicles en aquesta entrada en alguns instants de la simulació. Aquest fet també es veu representat en la velocitat mitjana de l'entrada, ja que el màxim permès són 50 quilòmetres per hora i la mitjana es troba molt per sota, degut a que part del temps els vehicles han estat aturats.

- El detector 11 presenta un error també important, degut principalment a la falta de vehicles generats a l'entrada E6, ja que com s'ha comentat, ha estat part del temps embossada. Per contra, la velocitat mitjana de la via és superior a l'esperada. El model que governa els vehicles, tendeix a portar-los a tots a la velocitat màxima de la via. Tret d'algun canvi de carril inesperat, com no hi havia retenció a la via principal, tots els vehicles han pogut circular a la velocitat màxima de la via.
- Per a la sortida S5 no es disposaven de dades. Tot i això, no s'ha assolit el flux esperat que s'havia calculat pensant en el principi de continuïtat. Igual que amb el detector 11, això és degut a l'error acumulat del trànsit de l'entrada E6. D'altra banda, la velocitat mitjana de la via és igual a la màxima. Això significa que no hi ha hagut cap retenció ni cap frenada imprevista i tots els vehicles han sortit de manera fluida.

- El detector 10 acumula el mateix error que el detector 11. Les causes són les mateixes.
- A l'entrada E5 s'ha produït el mateix cas que en l'entrada E6. A mesura que ha avançat la simulació i ha incrementat el trànsit, s'han donat situacions en que cap vehicle s'incorporava a la via principal. Aquest fet ha comportat una disminució del flux de vehicles tant en aquest detector com en els que es trobaran més endavant.
- El detector E8, al final del tram simulat, ha vist acumulat l'error de les dues entrades que no han arribat a generar els fluxos desitjats. La velocitat segueix sent casi la màxima per el mateix motiu ja explicat.

Un cop analitzats els resultats de la simulació, es pot comprovar com el comportament del model comparteix moltes similituds amb la via real de les Rondes. S'assumeix que l'error del model degut als petits embossaments apareguts en la simulació és degut al funcionament del trànsit al SUMO, que difereix en part del comportament dels conductors reals del les Rondes. D'aquesta manera, es dona per validat el model de les Rondes.

## 6. Impacte Mediambiental

Degut a que aquest treball és purament teòric, no ha involucrat la construcció de cap prototip o similar. Aleshores, tant la demanda de recursos com l'impacte mediambiental produït per possibles emissions es veu favorablement reduït.

Alguns aspectes que es poden tenir en compte per a l'impacte ambiental del projecte són el consum d'energia elèctrica de l'ordinador on s'han realitzat les simulacions i s'ha redactat la memòria i els desplaçaments que ha hagut de realitzar l'enginyer durant la realització d'aquest projecte. Es pot concloure doncs que aquests aspectes tenen un efecte mínim en el medi ambient.

Altrament, el model de les Rondes creat en aquest treball, pot ser utilitzat per realitzar estudis sobre el consum energètic del trànsit de les Rondes i les emissions dels vehicles. SUMO incorpora eines per estudiar aquests dos camps. Per tant, es considera que aquest projecte pot habilitar la realització d'estudis i simulacions per tal de reduir l'impacte ambiental dels vehicles que circulen per les Rondes, sent aquest un impacte de magnitud considerable.



## 7. Pressupost

Per al càlcul del pressupost total del projecte s'han tingut en compte les hores de feina de l'enginyer responsable, el material físic que ha sigut necessari durant el projecte, el software utilitzat i altres serveis involucrats. A la taula següent es troba el càlcul del pressupost del projecte.

Concepte	Quantitat	Preu unitari	Cost
Enginyer	300 hores	25 €/hora	€ 7.500,00
Ordinador	1 unitat	2.799 €/unitat	€ 2.799,00
Material d'oficina	-	-	€ 40,00
Software	3 mesos	7 €/mes	€ 21,00
Consum elèctric	300W x 250 hores	0,14 €/KWh	€ 10,50
Transport	-	-	€ 20,00
Accès a Internet	3 mesos	14,90 €/mes	€ 44,70
Cost TOTAL (sense IVA)			€ 8.624,13
IVA (21%)			€ 1.811,07
<b>Cost TOTAL</b>			<b>€ 10.435,20</b>

*Taula 13. Càlcul del pressupost del projecte (Font pròpia)*

El preu total del projecte incloent l'IVA és 10.435,20€. Aquest preu està principalment atribuït al sou de l'enginyer, pel que s'han computat un total de 300 hores de feina. Els segon concepte més costós ha estat l'ordinador necessari per dur a terme les simulacions. Els demés conceptes tenen un pes menys important en l'import total. El concepte "Software" correspon únicament a la llicència de Microsoft Office, ja que els demés programes utilitzats i mencionats en aquest treball són totalment lliures. També aclarir que el concepte transport fa referència als trajectes realitzats per acudir a les diferents entitats relacionades amb el trànsit de les Rondes i a la universitat.

## Conclusions

Segons els resultats obtinguts en aquest treball, s'han obtingut diverses conclusions i també s'han definit recomanacions per a una continuació futura del treball.

Primerament, s'ha modelitzat la xarxa de les Rondes de Barcelona. Aquest procés ha estat documentat pas a pas, no només per entendre aquest cas en concret, sinó per poder modelitzar altres escenaris de la mateixa manera. El model final ha estat compartit de manera lliure al públic.

Seguidament, s'ha estudiat el trànsit a les Rondes i s'ha realitzat un model per tal de simular el trànsit al SUMO. Aquestes dades no han pogut ser compartides amb tercers degut a que no són de propietat lliure.

Finalment, s'ha realitzat una simulació en el model de les Rondes creat amb el model de trànsit calculat per tal de verificar la validesa de la xarxa. Aquest model ha obtingut uns resultats amb un error de fins al 33%. Aquest error és considerable, però tot i això, es dona per validat el model. Diversos han sigut els mètodes utilitzats per construir la xarxa de les Rondes, i s'ha verificat la seva validesa comparant diferents serveis de dades geogràfiques.

Tot i haver assolit els objectius definits a l'inici del treball, es considera que un aspecte en concret podria ser desenvolupat i estudiat més en detall. Els resultats de la simulació han diferit considerablement dels resultats esperats. Això es degut a que el model del trànsit diferia de la realitat de la que s'havien obtingut les dades. Per les Rondes de Barcelona, hi circulen molt tipus de vehicles, i cada conductor té la seva manera de conduir. Al SUMO s'ha utilitzat únicament un model de conducció i tots els vehicles tenien exactament les mateixes característiques. Per a futures comprovacions en la xarxa de les Rondes definida i compartida en aquest treball, seria interessant estudiar en detall la composició del trànsit de les Rondes i realitzar una simulació amb un grau de detall superior. Sobre tot, l'ús de diversos models de conducció al SUMO pot portar a obtenir resultats més realistes.

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

A continuació apareixen les referències bibliogràfiques que han estat citades al llarg de la memòria.

- [1] Institute of Transportation Systems. *SUMO – Simulation of Urban MObility*.  
[[https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931\\_read-41000/](https://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/)]
- [2] Ajuntament de Barcelona, *Dades bàsiques de mobilitat 2015*, Barcelona: setembre de 2016.
- [3] Àrea d'Ecologia, Urbanisme i Mobilitat. Ajuntament de Barcelona, *Dades bàsiques de mobilitat. Informe 2016*, Barcelona: 2017.
- [4] SUMO. *SUMO User Documentation*.  
[[http://sumo.dlr.de/wiki/SUMO\\_User\\_Documentation](http://sumo.dlr.de/wiki/SUMO_User_Documentation)]
- [5] OpenStreetMap. [<https://www.openstreetmap.org/>]
- [6] JOSM. [<https://josm.openstreetmap.de>]
- [7] Google Maps. [<https://www.google.com/maps/>]
- [8] RACC. *Informació de trànsit*. [<http://infotransit.racc.es>]
- [9] Servei Català de Trànsit. *Mapa Continu de Trànsit*. [<http://mct.gencat.cat>]
- [10] Departament d'Estadística i Difusió de Dades. Ajuntament de Barcelona. *Volum de trànsit (mitjana diària de vehicles en dia feiner) als carrers amb més intensitat circulatòria*.  
[<http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/cap15/C1511020.htm>]
- [11] Departament d'Estadística i Difusió de Dades. Ajuntament de Barcelona. *Volum de trànsit (mitjana diària de vehicles en dia feiner) als accessos a la ciutat*.  
[<http://www.bcn.cat/estadistica/catala/dades/anuari/cap15/C1511010.htm>]

### Bibliografia complementària

En aquest apartat s'inclou una llista de referències que no figuren esmentades al llarg del

treball però han sigut consultades i són relatives a la temàtica d'objecte del treball.

- [1] Agència d'Ecologia Urbana de Barcelona. Ajuntament de Barcelona. *Pla de Mobilitat Urbana de Barcelona (PMU 2013-2018)*. Gener de 2015.
- [2] Ajuntament de Barcelona. Pacto por la movilidad. *La red básica de circulación de la Ciudad de Barcelona*. Vol. 4. Novembre de 2002.
- [3] Servei de dades obertes de l'Ajuntament de Barcelona. *Equipaments de mesura d'aforaments de la ciutat de Barcelona*. Setembre de 2018
- [4] Dades obertes de Catalunya. Generalitat de Catalunya. *CATNET Web*.  
[<https://analisi.transparenciacatalunya.cat/Medi-Ambient/CATNET-Web/wsqq-ca9e>]
- [5] Mobilitat. Ajuntament de Barcelona. *Trànsit*.  
[<https://com-shi-va.barcelona.cat/ca/transit>]